Smyth

ATOM ENERGIE

Offizieller Bericht über die Entwicklung der Atombombe von Henry DeWolf Smyth

übersetzt und erläutert von Prof. Dr. Friedr. Dessauer

U 238

U 235

ATOM ENERGIE

und ihre Verwertung im Kriege

U 235

U 235

Ein historisches Dokument hohen Ranges

Eine Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Forschung und der technischen Entwicklung, die zur Herstellung von Atombomben führte. Vollständiger Text des offiziellen Berichtes des amerikan. Kriegsministeriums in neuer erweiterter Form mit dem britischen und kanadischen Regierungsbericht.

EB

Smyth

ATOM ENERGIE

Offizieller Bericht über die Entwicklung der Atombombe von Henry DeWolf Smyth

übersetzt und erläutert von Prof. Dr. Friedr. Dessauer

ATOM ENERGIE

und ihre Verwertung im Kriege

Ein historisches Dokument hohen Ranges

Eine Gesamtdarstellung der wissenschaftlichen Forschung und der technischen Entwicklung, die zur Herstellung von Atombomben führte. Vollständiger Text des offiziellen Berichtes des amerikan. Kriegsministeriums in neuer erweiterter Form mit dem britischen und kanadischen Regierungsbericht.

EB

Der hier erstmals in deutscher Sprache wiedergegebene offizielle Bericht der nordamerikanischen, englischen und kanadischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über Atomkern-Energie und ihre friedliche und kriegerische Nutzung ist ein historisches Dokument hohen Ranges. Niemals vorher in der menschlichen Geschichte ist ein solch gigantisches technisches Unternehmen auf naturwissenschaftlicher Basis geplant und in kurzer Frist durchgeführt worden. Allein der nordamerikanische Anteil während des zweiten Weltkrieges bedeutet, daß etwa 150 000 Menschen, darunter etwa 14 000 Physiker, Chemiker und Ingenieure, mit einem Aufwand von zwei Milliarden Dollar sich einsetzten, um durch eine neue Waffe den Sieg sicherzustellen und durch eine neue Energiequelle den wachsenden Bedarf der Welt zu befriedigen.

Der «Smyth-Bericht», wie ihn die Welt kurzweg nennt, enthält die wichtigsten Informationen über die physikalischen und chemischen Arbeiten. Aber darüber hinaus die ganze Geschichte des organisatorischen Aufbaus in allen wesentlichen Zügen: von der grundlegenden Entdeckung Otto Hahns bis zu dem entscheidenden Bombenversuch bei Alamogordo. Verschwiegen werden zahlreiche technische Verfahren und physikalische und chemische Daten. Darin besteht das noch heute wohlbehütete «Geheimnis». Dagegen gibt es keine prinzipielle Geheimhaltung über die Grundfragen der Art und Nutzung der Atomkern-Energie.

Mit seinem Buche wendet sich der Verfasser nicht nur an Naturwissenschaftler und Techniker, sondern an alle denkenden und besorgten Menschen. Die Menschheit muß wissen, was in Laboratorien und Konstruktionssälen im Verborgenen geschah. Denn die Naturforschung macht Weltgeschichte, und wir alle sind durch ihre Ergebnisse vor verantwortungsvolle Entscheidungen gestellt.

ATOMENERGIE

und ihre Verwertung im Kriege

ATOMENERGIE

und ihre Verwertung im Kriege

Offizieller Bericht über die Entwicklung der Atombombe

von

Henry DeWolf Smyth
Princeton University

Nach der erweiterten Ausgabe von 1946 übersetzt und erläutert

von

Prof. Dr. Friedrich Dessauer
Direktor des Physikal. Instituts der Universität Freiburg/Schweiz

1947

Ernst Reinhardt Verlag AG., Basel

Der Titel der englischen Originalausgabe lautet:
Atomic Energy for Military Purposes
Verlag der Princeton University Press, Princeton, N.J.

Druck von Friedrich Reinhardt AG. Basel
Printed in Switzerland

INHALT

VORWORT ZUR DEUTSCHEN AUSGABE

Der hier erstmals in deutscher Sprache wiedergegebene offizielle Bericht der nordamerikanischen, englischen und kanadischen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten über Atomkernenergie und ihre friedliche und kriegerische Nutzung ist ein historisches Dokument hohen Ranges. *Niemals vorher in der menschlichen Geschichte ist ein solch gigantisches technisches Unternehmen auf naturwissenschaftlicher Basis geplant und (in kurzer Frist) durchgeführt worden. Suezkanal und Panamadurchstich, die vor nicht langer Zeit die Welt in Atem hielten, sind demgegenüber bescheidene Leistungen. Allein der nordamerikanische Anteil während des zweiten Weltkrieges bedeutet, daß etwa 150 000 Menschen, darunter etwa 14 000 Physiker, Chemiker und Ingenieure mit einem Aufwand an Mitteln ohnegleichen (die Ausgaben hiefür während des Weltkrieges allein in USA. betrugen zweitausend Millionen Dollar) sich einsetzten, um durch eine neue Waffe den Sieg sicherzustellen und durch eine neue Energiequelle den wachsenden Bedarf der Welt zu befriedigen. Entwicklungsarbeit, die in normalen Zeiten Generationen gedauert hätte, ist so in fünf Jahren geleistet worden. Und doch bedeutet das alles erst einen Anfang.*

Wie die Beteiligten selbst von der Bedeutung dieser Unternehmung denken, kommt an einigen Stellen des Dokumentes, am meisten in dem Augenzeugenbericht über den ersten Explosionsversuch in der Wüste von Neu-Mexiko (Anhang 6) zum Ausdruck. «Übergang in ein neues Zeitalter» *sagen diese Zeugen.* Und das ist wahr. Niemals *wurde den Händen des Menschengeschlechtes eine* solche Macht *anvertraut und damit* zugleich den Gewissen solche Verantwortung, *die ohne Ausnahme jedem von uns Sterblichen auferlegt ist. Wird diese Macht zum Segen, zur Entfaltung der Zivilisation, zur Entlastung von primitiver knechtischer Arbeit, zur Stillung von Mangel dienen, oder zur Zerstörung der Kultur, zur Vernichtung überkommener, in Jahrhunderten erwor-*

bener Werte, zum Verderb des Abendlandes, zur Bedrohung der neuen Erdteile? Das alles hat die Vorsehung in die Gewissen und in die Hände unseres Geschlechtes gegeben.

Doch noch viel mehr: Die Entdeckung der Atomkern-Energie eröffnet ein neues, bisher verschlossenes Reich der Natur dem menschlichen Geist und zeigt ihm eine erschütternde Fülle von Zusammenhängen und Möglichkeiten. Mehr als die Entdeckung der Wärmemotoren und der Elektrizität unser Leben formte, wird das Leben der kommenden Generationen hievon beeinflußt werden. Schließt doch die Kenntnis vom Bau der Atome einen großen Teil der Kenntnis vom Bau des Weltalls in sich ein, des Weltalls, von dem wir einen unaussprechlich winzigen Teil bewohnen und so leicht für das Ganze nehmen. Unsere geistige Schau wird gewaltig erweitert und die Größe der Schöpfung, vor der einst Augustinus, Newton, Kepler, Kant und so viele andere erschauerten, packt uns mit größerer Macht als je.

Der «Smyth-Bericht», wie ihn die Welt kurzweg nennt, enthält die wichtigsten Informationen über die physikalischen und chemischen Arbeiten und über einen Teil der technischen; aber darüber hinaus die ganze Geschichte des organisatorischen Aufbaues in allen wesentlichen Zügen. So erfährt man die Entwicklung von der grundlegenden Entdeckung Otto Hahns, auf der alles Weitere beruht, bis zu dem Bau und Betrieb der Riesenwerke von Clinton und Pasco und dem entscheidenden Bombenversuch bei Alamogordo; vom Brief Albert Einsteins an Präsident Roosevelt bis zur Vollendung des «Manhattan Projekts». Verschwiegen werden viele technische Verfahren und physikalische und chemische Daten. Darin besteht das noch heute wohlbehütete «Geheimnis». Dagegen gibt es eine prinzipielle Geheimhaltung über die Grundfragen der Art und Nutzung der Atomkern-Energie selbst nicht.

Die Leistungen der angelsächsischen, besonders der nordamerikanischen Autoren und die ihrer europäischen in USA. tätigen Mitarbeiter aus anderen Staaten treten naturgemäß mehr in den Vordergrund, als die auch sehr wichtigen Beiträge anderer, wie französischer, deutscher, schweizerischer Gelehrter.

Angesichts dieser Bedeutung des Berichtes als eines der ganz großen historischen Dokumente hat der Übersetzer den ganzen

englischen Text ohne jede Kürzung *und so wortgetreu wie möglich (selbst manchmal auf Kosten der sprachlichen Flüssigkeit) wiedergegeben. — Bei der Übersetzung und ihrer Kontrolle hat ihn Frl. Dr. A. Loebenstein, bis vor kurzem Assistentin am Physikal. Institut in Freiburg (Schweiz), trefflich unterstützt. (Die Erstübersetzung des kanadischen und englischen Berichtes stammte von ihr.) Herr H. Jungck, der Leiter des Reinhardt-Verlages, überprüfte sorgsam die ganze Übersetzung. Auch ihm sei hiefür bestens gedankt. Da Professor Smyth gut verständlich darstellt und nicht zu viel naturwissenschaftliche Vorkenntnisse voraussetzt, konnte Zahl und Umfang der Erläuterungen beschränkt werden. Beibehalten wurde die Textgliederung nach dem System von Malvil Dewey, die das Verweisen und Bezugnehmen auf Textstellen, die Anlage und Benutzung des Registers und den Vergleich mit dem Urtext sehr erleichtert, so das ganze Buch übersichtlicher macht. Auch die Figuren entsprechen genau denen der Originalausgabe, so daß Absatz für Absatz mit ihr verglichen werden kann.*

Der Leserkreis dieses Smyth-Berichtes in allen Ländern ist sehr groß. In USA. sind bereits fünf große Auflagen vergriffen. So hat es ja auch der Verfasser gewünscht, der ausdrücklich hervorhebt, daß er nicht nur für Naturwissenschafter und Techniker aller Art, sondern für alle denkenden und besorgten Menschen schrieb. Leser, die Schwierigkeiten bei den physikalischen und technischen Darlegungen haben, können in des Übersetzers Buch über Atomenergie (2. Aufl., Verlag Walter & Co., Olten) sich Rat holen. Die Übersetzung war keine kleine Mühe für einen vielbeschäftigten Mann im Beruf. Aber diese Mühe erschien mir fast wie eine Pflicht. Die Menschheit muß wissen, was hier in den Laboratorien der Gelehrten und den Konstruktionssälen der Ingenieure im Verborgenen geschah, weil die Naturforschung Weltgeschichte macht und weil ihre Ergebnisse zu verantwortungsvollen Entscheidungen drängen.

Physikalisches Institut
der Universität Freiburg (Schweiz)

FRIEDRICH DESSAUER

EINFÜHRUNG DES BEAUFTRAGTEN DES AMERIKANISCHEN KRIEGSMINISTERIUMS

Die Geschichte der Entwicklung der Atombombe durch gemeinsame Anstrengungen vieler Gruppen in den Vereinigten Staaten erzählen, heißt über ein enormes Unternehmen Bericht erstatten: ein faszinierender Bericht, obwohl er in hohem Grade technischen Inhalts ist. Offensichtlich hindert Sorge für militärische Sicherheit auch gegenwärtig noch, diese Geschichte vollständig darzulegen. Immerhin gibt es keinen Grund, warum der Bericht über die Organisation des Atombombenprojekts und die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen die verschiedenen Entwicklungen aufgebaut wurden, nicht jetzt der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden sollte. Deshalb wird hier der Bericht von Professor H. D. Smyth vorgelegt.

Das Buch enthält alle zur Sache gehörigen wissenschaftlichen Angaben, soweit sie in diesem Zeitpunkt für die Öffentlichkeit freigegeben werden können, ohne die Erfordernisse der nationalen Sicherheit zu verletzen. Jedoch sollte kein Ansinnen auf zusätzliche Informationen an Personen oder Organisationen gerichtet werden, die direkt oder indirekt mit dem Projekt verbunden sind. Personen, die, mit welchen Mitteln auch immer, zusätzliche Auskünfte beliebiger Art verraten oder sich verschaffen, ohne dazu bevollmächtigt zu sein, sind durch das Spionagegesetz schwerer Bestrafung unterworfen.

Der Erfolg dieser Entwicklungsarbeit ist vielen Tausenden von Wissenschaftlern, Ingenieuren, Arbeitern, Verwaltungsbeamten in ziviler und militärischer Stellung zu verdanken. Sie haben durch ihre Überarbeit, durch ihre schweigende Ausdauer und ihr aufrichtiges, hingebendes Zusammenwirken die hier beschriebenen beispiellosen technischen Lösungen ermöglicht.

L. R. GROVES
Major General, USA

War Department
Washington, D. C.
August 1945

VORWORT

Die letzte Verantwortung für die Politik unserer Nation ruht auf den Schultern ihrer Bürger. Diese können solcher Verantwortung nur dann in Klarheit gerecht werden, wenn sie unterrichtet sind. Vom Durchschnittsbürger kann man nicht erwarten, daß er volle Einsicht darein gewinnt, wie eine Atombombe konstruiert ist oder wie sie wirkt; aber in unserem Lande gibt es eine bedeutende Gruppe von Ingenieuren und Männern der Wissenschaft, die solche Dinge verstehen und die ihren Mitbürgern erklären können, welche Möglichkeiten für Atombomben sich daraus ergeben. Die vorliegende Darstellung ist für diese Berufsgruppen geschrieben als ein sachlicher Generalbericht über die Anstrengungen, die in den Vereinigten Staaten seit dem Jahre 1939 auf die Herstellung solcher Bomben abzielten. Sie ist weder ein offizielles geschichtliches Dokument noch eine technische Abhandlung für Fachleute. Notwendigkeiten der Geheimhaltung beeinflußten sowohl Einzelheiten des Inhalts wie die allgemeine Darstellung, so daß manche interessante Entwicklung ausgelassen werden mußte.

Die Hinweise auf die britischen und kanadischen Beiträge vollständig zu geben, war nicht beabsichtigt[1]; denn die vorliegende Darstellung ist vom Gesichtspunkt der amerikanischen Bemühungen geschrieben.

Der Verfasser hofft, daß der Bericht im wesentlichen genau ist. Er dankt allen Helfern, die an dem Projekt mitarbeiteten, und übernimmt die volle Verantwortung für etwaige unterlaufene Irrtümer.

H. D. SMYTH

1. Juli 1945

---

[1] Im Gegensatz zu dieser Bemerkung im Vorwort vom 1. Juli 1945 ist in der hier in Übersetzung vorgelegten neuen Ausgabe vom November 1945 der englische und kanadische Bericht hinzugefügt. (Siehe am Ende dieses Buches.)

(Diesem Vorwort ist in der zweiten Ausgabe vom 1. September 1945 im englischen Text eine Notiz angefügt über Änderungen, die gegenüber dem früheren Bericht vom 1. Juli vorgenommen wurden. Die Aufzählung von sechs kleinen Änderungen ist, weil überholt, hier weggelassen.)

Ferner enthält die hier übersetzte Ausgabe vom 1. November 1945 noch folgende zusätzliche Notiz zum Vorwort:

Dieser 5. Auflage des Princeton-Berichtes sind zwei neue Anhänge beigefügt: Anhang VII enthält den Text einer Darstellung des britischen Informationsdienstes und Anhang VIII denjenigen des kanadischen Informationsdienstes.

H. D. SMYTH

1. November 1945

I. KAPITEL. EINFÜHRUNG

1.1. Der Zweck dieses Berichtes geht dahin, die wissenschaftliche und technische Entwicklung zu beschreiben, die hierzulande seit dem Jahre 1940 dem militärischen Gebrauch der Atomkernenergie gewidmet war. Obwohl der Bericht nicht als eine populäre Erzählung des Gegenstandes geschrieben ist, soll er doch verständlich sein sowohl für Wissenschaftler und Ingenieure als auch für andere Gebildete mit einem guten physikalischen und chemischen Grundwissen. Die Äquivalenz von Masse und Energie ist in der Einleitung als Leitprinzip für die Darstellung der Grundlagen gewählt worden.

ERHALTUNG VON MASSE UND ENERGIE

1.2. Zwei Prinzipien bilden die Ecksteine im Gebäude der modernen Naturwissenschaft. Das erste sagt aus, daß *Materie* weder erzeugt noch vernichtet, vielmehr nur in ihrer Gestalt verändert werden kann. Dieses Prinzip wurde im 18. Jahrhundert ausgesprochen und ist jedem Chemiestudenten vertraut; es führte zu dem Satz, den man unter dem Namen «Erhaltung der Masse» kennt. Das andere Grundgesetz, daß *Energie* nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur in der Form verändert werden kann, ergab sich im 19. Jahrhundert und war seitdem der Kummer der Erfinder des Perpetuum mobile. Es ist unter dem Namen «Prinzip der Erhaltung der Energie» bekannt.

1.3. Diese beiden Prinzipien haben seither die Entwicklung und Anwendung der Wissenschaft geleitet und geregelt. Für alle praktischen Anwendungen galten sie unverändert und getrennt bis vor etwa fünf Jahren. Für die meisten praktischen Anwendungen bleibt das auch heute so; aber man weiß jetzt, daß es sich im Grunde um zwei Äußerungen *eines einzigen* Prinzips handelt. Denn inzwischen wurde entdeckt, daß Energie in manchen Fällen in Materie und Materie in manchen Fällen in Energie verwandelt werden kann. Im speziellen wurde eine solche Ver-

wandlung bei dem Phänomen der Kern*spaltung* von Uran entdeckt, einem Prozeß, in dem Atomkerne in Splitter auseinanderbrechen, wobei ein riesiger Betrag von Energie freigegeben wird. Die militärische Ausnützung dieser Energie war das Objekt der Forschungs- und Erzeugungspläne, die in diesem Bericht beschrieben sind.

DIE ÄQUIVALENZ VON MASSE UND ENERGIE

1.4. Eine Folgerung, die sich ziemlich früh bei der Verfolgung der Relativitätstheorie ergab, war die, daß die träge Masse eines bewegten Körpers mit seiner Geschwindigkeit wächst. Sie schloß eine Äquivalenz zwischen der Vermehrung der Bewegungsenergie eines Körpers, der «kinetischen Energie», und der Massenvermehrung dieses Körpers in sich. Für die meisten praktischen Physiker und Ingenieure bedeutet das zunächst eine mathematische Angelegenheit ohne praktische Bedeutung. Selbst Einstein[1] hätte kaum die heutige Anwendung voraussehen können. Aber bereits 1905 konstatierte er klar die Energie-Massen-Äquivalenz und sprach die Vermutung aus, daß der Nachweis dieser Äquivalenz sich beim Studium der radioaktiven Substanzen bieten werde. Er schloß, daß der Betrag der Energie, der einer Masse m äquivalent ist, gegeben sei durch die Gleichung

$$E = mc^2$$

Darin ist c die Lichtgeschwindigkeit. Wenn sich das zahlenmäßig bewährte, war der grundlegende Charakter dieses Gesetzes offenbar. Die Gleichung zeigt, daß ein kg Materie, ganz in Energie verwandelt, 25 Milliarden Kilowattstunden Energie liefern würde. Das ist ebensoviel Energie wie jene, die von der gesamten elektrischen Industrie der Vereinigten Staaten im Jahre 1939 in ungefähr zwei Monaten erzeugt wurde. Man vergleiche diese phantastische Ziffer mit dem Betrag von 8,5 Kilowattstunden Wärmeenergie, die erzeugt wird, wenn man die gleiche Menge Kohle verbrennt.

---

[1] Außer A. Einstein sind besonders Walter Kaufmann, Königsberg (Massenzuwachs schnellbewegter Elektronen) und Friedr. Hasenöhrl, Wien (Impuls der Photonen) an der Entdeckung des Äquivalenzgesetzes beteiligt.

1.5. Die außerordentliche Größe dieser Verwandlungszahl war in mehreren Beziehungen von Interesse. In erster Linie erklärte sie, warum die Äquivalenz von Masse und Energie bei chemischen Verbrennungen nie beobachtet worden war. Jetzt sehen wir ein, daß die Erhitzung bei einer solchen Verbrennung zwar die Masse erhöht, aber diese zusätzliche Masse ist so klein, daß sie auch mit den feinsten zur Verfügung stehenden Waagen nicht beobachtet werden kann. Sie beträgt der Größenordnung nach nur einige Milliardstel Gramm pro Mol. In zweiter Linie wurde durch diese Zahl klargestellt, daß keine merklichen Quantitäten von Materie bei irgendeinem irdischen Prozeß in Energie verwandelt wurden, solange nicht gewaltige Energiequellen bekannt waren. Ferner schien die Möglichkeit, auf praktische Weise eine solche Transformation einzuleiten und zu messen, sehr gering. Schließlich eröffnete die wahre Größe des Umwandlungsfaktors ein großartiges Feld der Spekulation für Philosophen, Physiker, Ingenieure und Kabarettisten. 25 Jahre lang waren diese Spekulationen nicht direkt experimentell gestützt, aber ungefähr vom Jahre 1930 an kam es in rapid steigendem Maße zu experimentellen Bestätigungen. Bevor wir jedoch den Nachweis und die experimentelle teilweise Verwandlung der Materie in Energie, die unser Hauptthema bildet, erörtern, müssen wir die Grundlehren der Atom- und Kernphysik kurz darlegen. Eine allgemeine Vertrautheit mit der Atomstruktur der Materie und mit der Existenz von Elektronen wird vorausgesetzt. Unsere Darlegungen gehen nur wenig über das hinaus, was in den bekannten Büchern wie Pollard und Davidson's «Applied Physics» enthalten ist[1].

RADIOAKTIVITÄT UND ATOMSTRUKTUR

1.6. Zuerst von *H. Becquerel* im Jahre 1896 entdeckt und anschließend von *Pierre* und *Marie Curie, E. Rutherford* und manchen anderen studiert, spielten die radioaktiven Phänomene eine führende Rolle bei der Entdeckung der allgemeinen Gesetze der Atomstruktur und bei der Bestätigung der Äquivalenz von Masse und Energie.

---

[1] Da ein analoges deutschsprachiges Buch z. Zt. nicht vorliegt, verweist der Übersetzer auf sein Buch «Atomenergie», 2. Aufl., Verlag Walter & Co., Olten 1947.

Ionisation durch radioaktive Substanzen

1.7. Das erste beobachtete Phänomen der Radioaktivität war die Schwärzung von photographischen Platten durch uranhaltige Mineralien. Obwohl dieser Effekt auch heute noch zu einigen radioaktiven Untersuchungen benutzt wird, ist diejenige Eigenschaft der radioaktiven Substanzen, der die größte wissenschaftliche Bedeutung zukommt, ihre Fähigkeit, Gase zu ionisieren. Unter normalen Bedingungen leiten Luft und andere Gase die Elektrizität nicht; sonst könnten Kraftleitungen und elektrische Maschinen nicht in der freien Luft wirksam sein, was doch der Fall ist. Aber unter gewissen Umständen lassen sich die (an sich neutralen) Gasmoleküle in negativ und positiv geladene Träger zerlegen, die man Ionen nennt[1]. In dieser Weise ionisierte Luft leitet die Elektrizität. Bereits wenige Monate nach der ersten Entdeckung der Radioaktivität fand *Becquerel,* daß Uranium die Fähigkeit hat, Luft zu ionisieren. Im einzelnen fand er, daß die Ladung eines Elektroskops rasch zurückgeht unter dem Einfluß von Luft, wenn Uraniumsalz in der Nähe ist. (Dasselbe würde geschehen mit einem Akkumulator, wenn genügend Mengen radioaktiver Stoffe in der Nähe liegen). Seit dieser Zeit dient der Gang der Entladung eines Elektroskops als Maß der radioaktiven Intensität. Überdies beruhen fast alle modernen Instrumente zum Studium der radioaktiven Substanzen direkt oder indirekt auf dem Ionisationseffekt. Ein elementarer Bericht über solche Instrumente, hauptsächlich Elektroskope, Geiger-Müller-Zähler, Ionisationskammern und Wilsonsche Nebelkammern ist im Anhang 1 gegeben.

Die verschiedenen Strahlungen oder Teilchen

1.8. Die Beobachtung, daß verschiedene radioaktive Substanzen sich sowohl in der Art wie in der Intensität der ionisierenden

---

[1] Die Fassung des Textes könnte mißverstanden werden. Gasmoleküle werden im allgemeinen nicht in dem Sinne zerlegt, wie gelöste Moleküle in Elektrolyten (Dissoziation). Es werden vielmehr ein oder mehrere Elektronen von den Gasmolekülen abgesondert, so daß diese ein- oder mehrfach positive Ladung zeigen. Die Elektronen lagern sich ihrerseits an Moleküle an, die damit negativ werden. Mit den dissoziierten Molekülen haben sie den Namen Ionen gemeinsam, sind aber anders gebaut, da ja bei ihnen keine molekulare Aufspaltung vorzuliegen braucht.

Wirkung unterscheiden, wies darauf hin, daß man es mit verschiedenen Arten von «Strahlungen» zu tun habe. Einige Arten waren viel stärker durchdringungsfähig als andere; infolgedessen können zwei radioaktive Präparate, die auf ein ungeschirmtes Elektroskop die gleiche Wirkung haben, eine verschiedene Wirkung geben, wenn die Elektroskope abgeschirmt sind, d. h. wenn Schirme zwischen den Präparaten und dem Elektroskop stehen. Von diesen Schirmen sagt man, sie absorbieren die Strahlungen.

1.9. Studien über Absorption und andere Phänomene zeigten, daß tatsächlich drei Arten von «Strahlungen» aus den radioaktiven Substanzen hervorgehen. Zunächst gibt es sogenannte Alpha-Partikel (α), die aus schnellen ionisierten Heliumkernen bestehen, ferner Beta-Teilchen (β), d. h. schnelle Elektronen, und schließlich Gamma-Strahlen (γ), die elekromagnetische Strahlen sind, ähnlich den Röntgenstrahlen. Streng genommen sind nur die Gamma-Strahlen eigentliche Strahlen, und sie wirken sogar ähnlich wie (geladene) Partikel wegen ihrer kurzen Wellenlänge. Solch ein Gamma-Strahlenquant, also ein einzelner elektromagnetischer Gamma-Strahl, wird Photon genannt. Im allgemeinen sind die Gamma-Strahlen sehr durchdringungsfähig, die Alpha- und Beta-Strahlen weniger. Obwohl Alpha- und Beta-Strahlen nicht sehr durchdringungsfähig sind, haben sie für Teilchen von Atomgröße enorme kinetische Energien, tausendmal größer als die kinetische Energie der Gasmoleküle, die diese auf Grund ihrer Wärmebewegung besitzen, und tausendmal größer als der Energieaustausch der Atome bei chemischen Reaktionen. Wegen dieser hohen kinetischen Energie vermutete Einstein, daß beim Studium der radioaktiven Substanzen die Äquivalenz von Masse und Energie bewiesen werden könne.

Das Atom

1.10. Bevor wir überlegen, welche Typen von Atomen Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen aussenden und bevor wir die Emissionsgesetze dieser Strahlen erörtern, wollen wir die Vorstellungen über die allgemeine Bauweise der Atome darlegen, Vorstellungen, die z. T. auf dem Studium der Radioaktivität beruhen.

1.11. Nach unserer gegenwärtigen Anschauung besteht jedes Atom aus einem kleinen schweren Kern von etwa 10^{-12} cm

Durchmesser, umgeben von einer relativ großen leeren Region von 10^{-8} cm Durchmesser, in der Elektronen umlaufen, in einer gewissen Ähnlichkeit wie Planeten um die Sonne[1]. Der Kern trägt ein ganzzahliges Vielfaches von Einheitsladungen positiver Elektrizität, deren jede $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb beträgt (vergleiche Anhang 2 zur Diskussion der Einheiten). Jedes Elektron trägt eine negative Ladung von dieser gleichen Größe, und die Zahl der den Kern umlaufenden Elektronen ist gleich der Anzahl der positiven Ladungen des Kerns, so daß das Atom als ganzes (nach außen hin) die Ladung null zeigt.

1.12. *Atomnummer und Elektronenstruktur:* Die Anzahl der positiven Ladungen des Kerns wird als Atomnummer oder Ordnungszahl Z des Atoms bezeichnet. Sie bestimmt zugleich die Anzahl der Elektronen in der extranukleären Außenzone des Atoms, und diese wiederum bestimmt die chemischen Eigenschaften des Atoms. Auf diese Weise haben alle Atome eines gegebenen chemischen Elementes dieselbe Atomnummer, und umgekehrt sind alle Atome mit der gleichen Atomnummer Atome des gleichen Elementes ohne Rücksicht auf mögliche Unterschiede in ihrer Kernstruktur. Die äußeren (extranukleären) Elektronen in einem Atom ordnen sich in aufeinanderfolgenden Schalen nach gut bestätigten Gesetzen. Optische Spektra stammen von Störungen in den äußersten Elektronenschalen, Röntgenstrahlen von Störungen der inneren, dem Kern näheren Schalen. Die chemischen Eigenschaften eines Atoms hängen von den äußersten Elektronen ab, und die Bildung chemischer Verbindungen ist begleitet von geringfügigen Umgruppierungen dieser Elektronenstruktur. Daraus ergibt sich: wenn Energie durch Oxydation, Verbrennung, Explosion oder andere chemische Prozesse nach außen abgegeben wird, so wird sie auf Kosten der Elektronenstruktur gewonnen, so daß die Gruppierung der Elektronen im Reaktionsprodukt einen verminderten Energiegehalt bedeutet. (Das läßt vermuten, daß auch die Gesamt*masse* solcher Produkte entspre-

---

[1] Damit ist auf die ursprüngliche erste Fassung des Atommodells von N. Bohr angespielt. Man stellt sich heute die Elektronen der Atomschalen nicht mehr als planetenartig umlaufend vor, sondern (Born) nach Ergebnissen der Wellenmechanik als eine (statistische) Ladungsverteilung in der Schale.

chend geringer ist, aber in einem nicht meßbaren Grade.) Kein chemischer Prozeß kann den Atomkern selbst angreifen.

1.13. *Die Massenzahl:* Nicht nur ist die positive Kernladung stets ein ganzzahliges Vielfaches einer Elektronenladung (Einheitsladung $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb), auch die Masse des Kerns ist immer annähernd ein ganzzahliges Vielfaches einer fundamentalen Masseneinheit, die nahezu der Masse des Protons gleichkommt, das heißt des Kerns des Wasserstoffatoms (siehe Anhang 2)[1]. Diese ganze Zahl heißt die Massenzahl A und ist immer mindestens zweimal so groß wie die Atomnummer, ausgenommen beim Wasserstoff und bei einem seltenen Isotop des Heliums. Da die Masse eines Protons ungefähr 1800mal größer ist als die des Elektrons, repräsentiert die Masse des Kerns sehr angenähert die ganze Atommasse.

1.14. *Isotope und Isobare:* Man nennt zwei Atomarten mit der gleichen Atomnummer (Ordnungszahl), aber verschiedenen Massenzahlen Isotope. Sie sind chemisch identisch, da sie lediglich zwei Arten desselben chemischen Elementes sind. Wenn zwei Atomarten dieselbe Massenzahl haben, aber eine verschiedene Ordnungszahl, so nennt man sie Isobare; diese sind verschiedene chemische Elemente.

Radioaktivität und Kernänderung

1.15. Wenn ein Atom ein Alpha-Teilchen aussendet, (das die Ordnungszahl 2 und die Masse 4 hat), so verwandelt es sich in ein Atom eines *anderen* Elementes mit einer um zwei Einheiten niedrigeren Ordnungszahl und einer um vier Einheiten geringeren Massenzahl. Die Emission eines Beta-Teilchens durch einen Kern vermehrt die Ordnungszahl um 1 (da der Kern durch den Verlust einer negativen Ladung eine positive Ladung mehr erhält) und läßt die Massenzahl praktisch unverändert. In einigen Fällen sind diese Änderungen begleitet von Gamma-Emissionen. Elemente, die sich auf diese Weise spontan ändern oder abbauen, sind unstabil und werden als *radioaktiv* bezeichnet. Die einzigen natürlichen Elemente mit diesen Eigenschaften (Alpha- und Beta-

---

[1] Es ist jetzt üblich, statt des Wasserstoffkernes $^1/_{16}$ der Masse des Sauerstoffkernes als rechnerische Masseneinheit zu benutzen.

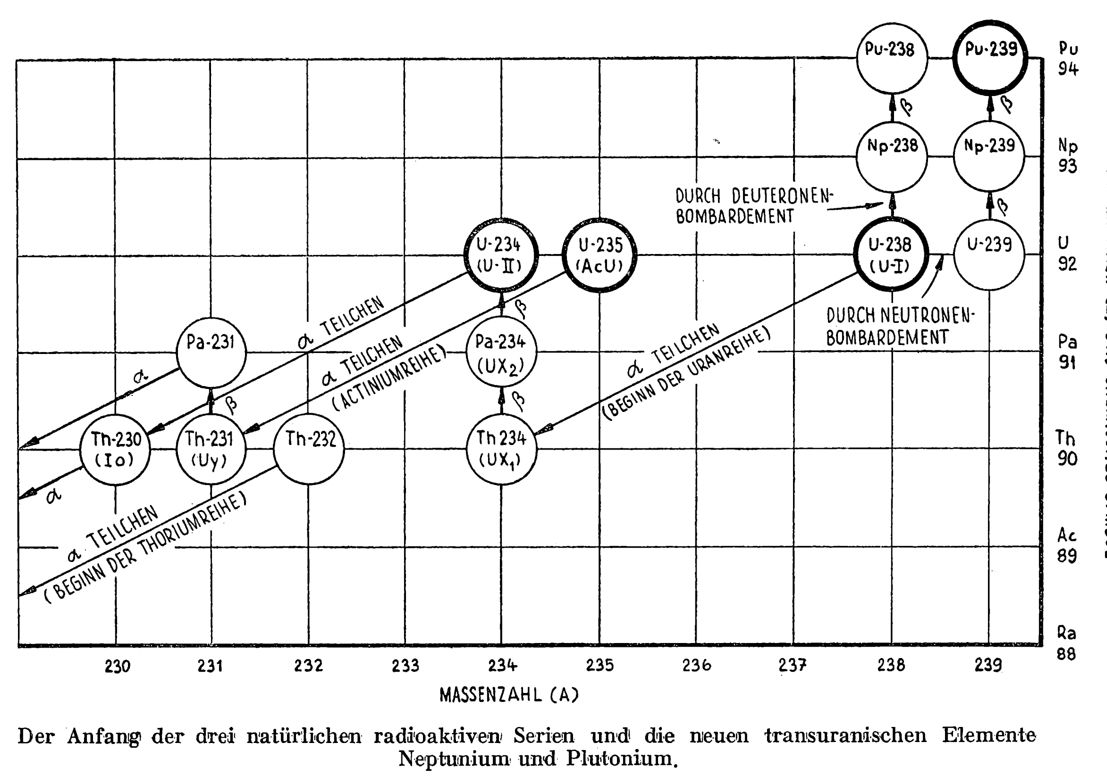
Teilchen zu emittieren) sind, mit einigen unbedeutenden Ausnahmen, diejenigen der höchsten Ordnungs- und Massenzahlen wie Uranium, Thorium, Radium und Actinium, also diejenigen, welche die komplizierteste Kernstruktur besitzen.

Halbwertszeit; die radioaktiven Familien

1.16. Für alle Atome eines und desselben radioaktiven Elementes besteht dieselbe Wahrscheinlichkeit, daß sie in einer gegebenen Zeit zerfallen, so daß irgendeine meßbare Menge eines gegebenen radioaktiven Elementes, die ja viele Millionen Atome enthält, sich stets im gleichen Rhythmus ändert oder «zerfällt». Der Rhythmus des Zerfalls kann dargestellt werden durch den Begriff der Halbwertszeit; das ist die Zeit, innerhalb welcher die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atome sich ändert, also abgebaut ist. Diese Halbwertszeit ist demnach eine Materialkonstante einer bestimmten radioaktiven Atomart. Die Halbwertszeiten der radioaktiven Stoffe liegen zwischen Bruchteilen von Sekunden für die unstabilsten und Billionen von Jahren für solche, die nur wenig unstabil sind. Oft ist der neugebildete Kern (der Tochterkern) ähnlich wie der Ursprungskern radioaktiv und so weiter, so daß eine Generationsfolge von Kernen entsteht, die schließlich in einem stabilen Schlußglied endet. Es gibt drei solche Familien oder Serien, die zusammen ungefähr 40 radioaktive Elemente enthalten. Die Radiumfamilie beginnt mit einem Isotop des Uraniums, die Actiniumfamilie mit einem anderen Isotop des Uraniums und die Thoriumfamilie mit dem Thorium. Das Endglied jeder Kette ist nach 10 bis 12 aufeinanderfolgenden Emissionen von Alpha- und Beta-Teilchen ein stabiles Bleiisotop.

Die erste künstliche Kernverwandlung

1.17. Vor dem Jahre 1919 hat niemand die Stabilität eines gewöhnlichen Atomkerns stören oder die Abbaugeschwindigkeit der radioaktiven Kerne beeinflussen können. Aber im Jahre 1919 zeigte Rutherford, daß Alpha-Partikel hoher Energie eine Veränderung im Kern eines gewöhnlichen Elementes herbeiführen können. Es gelang ihm nämlich, einige Stickstoffatome in Sauerstoffatome zu verwandeln mit Hilfe eines Bombardements durch



Der Anfang der drei natürlichen radioaktiven Serien und die neuen transuranischen Elemente Neptunium und Plutonium.

Alpha-Partikel. Man kann diesen Prozeß symbolisch niederschreiben:

$$He^4 + N^{14} \rightarrow O^{17} + H^1$$

Diese symbolische Gleichung bedeutet, daß ein Heliumkern von der Massenzahl 4, also ein Alpha-Partikel, auf einen Stickstoffkern von der Massenzahl 14 stößt und dabei einen Sauerstoffkern von der Massenzahl 17 und einen Wasserstoffkern von der Massenzahl 1 erzeugt. Der Wasserstoffkern, Proton genannt, hat eine besondere Bedeutung als Kern kleinster Masse. Obwohl Protonen bei den natürlichen radioaktiven Abbauprozessen nicht in Erscheinung treten, besitzt man jetzt reichlich direkte Nachweise, daß sie aus dem Kern herausgeschossen werden können.

1.18. In dem Jahrzehnt nach Rutherfords Entdeckung wurden viele ähnliche Experimente mit ähnlichen Erfolgen durchgeführt. Eine Serie von Experimenten dieser Art führte zur Entdeckung des Neutrons. Diese Entdeckung muß eingehend besprochen werden, denn das Neutron liefert praktisch die «Leitmelodie» des ganzen vorliegenden Projektes.

Das Neutron

1.19. Im Jahre 1930 fanden *W. Bothe* und *H. Becker* in Deutschland[1] folgendes: Wenn Alpha-Partikel von sehr hoher Energie (von Polonium ausgestrahlt) auf einige leichte Elemente treffen, insbesondere auf Beryllium, Bor oder Lithium, so entsteht dort eine ungewöhnlich durchdringungsfähige Strahlung. Zunächst wurde diese Strahlung als eine Gamma-Strahlung angesehen, obwohl sie durchdringender war als jede bisher bekannte Gamma-Strahlung, und obwohl es schwierig war, die Einzelheiten der experimentellen Resultate auf dieser Basis zu deuten. Der nächste wichtige Beitrag wurde von *Irène Curie* und *F. Joliot* in Paris im Jahre 1932 geliefert. Sie zeigten: Wenn diese unbekannte Strahlung auf Paraffin oder andere wasserstoffhaltige Verbindungen trifft, so werden Protonen von besonders hoher Energie ausgesandt. Das war an und für sich noch nicht unvereinbar mit der angenommenen Gamma-Strahlennatur der neuen Strahlung; aber quantitative Einzelanalysen lieferten Da-

[1] Kaiser-Wilhelm-Institut Heidelberg.

ten, die sich immer schwieriger mit dieser Hypothese vereinbaren ließen. Schließlich, später im gleichen Jahr 1932, führte *J. Chadwick*[1] in England eine Serie von Experimenten durch, die bewiesen, daß die Gamma-Strahlenhypothese nicht haltbar war. Er vermutete, daß tatsächlich die neue Strahlung aus ungeladenen Partikeln bestehe, die annähernd die Masse der Protonen haben müßten, und er bewies durch eine Serie von Experimenten diese seine Vermutung. Solche ungeladenen Partikel nennt man jetzt *Neutronen.*

1.20. Das einzige charakteristische Merkmal der Neutronen, das sie von anderen subatomaren Partikeln unterscheidet, ist die Tatsache, daß sie nicht geladen sind. Diese Eigenschaft der Neutronen verzögerte ihre Entdeckung, macht sie sehr durchdringungsfähig, macht es unmöglich, sie direkt zu beobachten und gibt ihnen eine hohe Wichtigkeit bei der Herbeiführung von (künstlicher) Kernumwandlung. Ein Atom in seinem normalen Zustand ist freilich auch ungeladen[2], aber es ist 10 000mal größer als ein Neutron[3], und es besteht aus einem komplexen System von negativ geladenen Elektronen im äußeren Atomraum um den positiv geladenen Kern. Geladene Partikel (wie Protonen, Elektronen oder Alpha-Teilchen) und elektromagnetische Strahlen (wie Gamma-Strahlen) verlieren Energie, wenn sie durch Materie dringen. Sie üben elektrische Kräfte aus, welche die Atome der von ihnen durchdrungenen Stoffe ionisieren. (Es handelt sich [bei der Ionisierung der Luft] um solche Prozesse, die Luft elektrisch leitfähig machen, wie das entlang dem Pfade elektrischer Funken oder Blitze geschieht.) Die bei der Ionisation aufgenommene Energie ist gleich der vom geladenen Partikel abgegebenen, das an Geschwindigkeit verliert, oder wenn es ein Gamma-Strahl ist, (ganz oder teilweise) absorbiert wird. Hingegen wird das *Neutron* von solchen Kräften nicht beeinflußt. Beeinflußt werden kann es nur durch eine Kraft von ge-

---

[1] J. Chadwick, Cambridge.

[2] In einer Distanz vom Atom, die am Atomdurchmesser gemessen groß ist, heben sich die Wirkungen der positiven Kernladung und der negativen Ladung der Atomschalen auf.

[3] Der sog. gaskinetische Atomdurchmesser ist von der Größenordnung 10^{-8} cm, der Kerndurchmesser 10^{-12} cm. Die Angabe «größer als» bezieht sich hier auf die Durchmesser, nicht auf die Volumina.

ringer Reichweite, d. i. durch eine Krafteinwirkung, die nur dann eintritt, wenn das Neutron ganz dicht an den Atomkern herankommt. Es handelt sich um die Gattung von Kräften, die auch den Atomkern selber zusammenhält, im Gegensatz zu den Abstoßungskräften der positiven Ladungen im Kern. Folglich geht ein freies Neutron ungestört seinen Weg, bis es direkt mit einem Atomkern zusammenstößt. Da die Kerne sehr klein sind, sind derartige Zusammenstöße selten, und die Neutronen legen einen langen Weg zurück, bevor sie mit einem Kern zusammenstoßen. Im Falle eines «elastischen» Zusammenstoßes treten die gewöhnlichen Gesetze (von der Erhaltung des Impulses und der kinetischen Energie) in Wirksamkeit, wie es bei elastischen Zusammenstößen etwa von Billardkugeln (annähernd) der Fall ist. Wenn der getroffene Kern schwer ist, erhält er durch den Stoß eine relativ kleine Geschwindigkeit; wenn er aber etwa ein Proton ist, das angenähert die Masse des Neutrons hat, dann wird er in der Stoßrichrichtung geschleudert mit einem hohen Teil der ursprünglichen Geschwindigkeit des stoßenden Neutrons, das selber entsprechend verlangsamt wird. Es können als Folge dieser Zusammenstöße sekundäre schnelle Teilchen («Projektile») gefunden und nachgewiesen werden, weil diese geladen sind und Ionisation erzeugen. Der ungeladene Charakter des Neutrons macht es nicht nur schwer, es festzustellen, sondern auch, es zu beeinflussen. Geladene Partikel kann man beschleunigen, verlangsamen oder ablenken durch elektrische oder magnetische Felder, aber diese Felder wirken nicht auf Neutronen. Überdies, freie Neutronen lassen sich nur durch Kernabbau gewinnen. Es gibt keine natürliche Quelle dafür. Die einzigen Mittel, um freie Neutronen zu beeinflussen, bestehen darin, in ihren Weg Atomkerne zu bringen, so daß sie durch Zusammenstöße verlangsamt, abgelenkt oder absorbiert werden. Wir werden sehen, daß diese Effekte von größter praktischer Bedeutung sind.

Das Positron und das Deuteron (Deutön)

1.21. Das Jahr 1932 brachte nicht nur die Entdeckung des Neutrons, sondern auch die des Positrons. Zuerst wurde es von *C. D. Anderson* am California Institute of Technology beobach-

tet. Es hat dieselbe Masse und die gleiche Ladung wie das Elektron, jedoch ist die Ladung positiv statt negativ. Für uns ist es fast nur als eines der Teilchen, die vom künstlichen radioaktiven Kern ausgesandt werden, von Interesse.

1.22. Noch eine andere große Entdeckung erfolgte im gleichen Jahr 1932. *H. C. Urey, F. G. Brickwedde* und *G. M. Murphy* fanden, daß Wasserstoff (H) ein Isotop von der Massenzahl 2 hat. Im natürlichen Wasserstoff kommt es im Verhältnis 1 : 5 000 vor (also 0,2 ‰). Wegen der speziellen Bedeutung dieser schweren Abart des Wasserstoffs gab man ihr einen eigenen Namen «Deuterium» und seinem Kern den Namen «Deuteron» (oder auch Deuton: D). Wie das Alpha-Partikel, so ist auch das Deuteron nicht einer der fundamentalen Bausteine der Kerne, aber es spielt eine wichtige Rolle für einige Prozesse zur Erzeugung des Kernzerfalls.

Kernstruktur

1.23. Es ist ein alter Gedanke, daß alle Elemente aus wenigen Urpartikeln aufgebaut seien. Diese Tatsache steht jetzt fest. Drei fundamentale Partikel bilden die Bauelemente: das Neutron, das Proton und das Elektron. Zu einer vollständigen Behandlung dieser Frage der Bausteine müßten wir noch das Positron, das wir soeben erwähnten, das Neutrino und das Mesotron besprechen. Das Deuteron und das Alpha-Teilchen, die gleichfalls schon erwähnt wurden, sind wichtige *zusammengesetzte* Teilchen.

1.24. Nach unserem gegenwärtigen Wissen sind die Kerne aller Atome aus Neutronen und Protonen aufgebaut. Die Anzahl der Protonen ist gleich der Ordnungszahl oder Atomnummer Z. Die Zahl der Neutronen N ist gleich der Differenz zwischen der Massenzahl und der Ordnungszahl, also N = A—Z. Zwischen diesen Teilchen wirken zwei Arten von Kräften, einmal die gewöhnlichen elektrischen Coulomb-Kräfte der Abstoßung zwischen den positiven Ladungen (der Protonen), und zweitens Kräfte der Anziehung auf winzige Distanzen zwischen allen Teilchen. Diese letzteren Kräfte sind heute nur teilweise erforscht, und wir werden nicht versuchen, dies hier zu erläutern. Es genügt zu sagen, daß die Kombination der Wirkung der anziehenden und absto-

ßenden Kräfte so beschaffen ist, daß nur bestimmte Kombinationen von Neutronen und Protonen einen stabilen Kern ergeben. Wenn die Anzahl der Neutronen und Protonen klein ist, ergibt sich Stabilität, sofern die beiden Zahlen ungefähr gleich sind. Für größere Kerne erfordert das Gleichgewicht einen höheren Anteil Neutronen. Am Ende des periodischen Systems, wo die Zahl der Protonen (und damit die Ordnungszahl) 90 übersteigt und die Anzahl der Neutronen fast 150 erreicht, gibt es keine vollständig stabilen Kerne mehr. (Einige von den schweren Kernen sind annähernd stabil, was aus ihren sehr langen Halbwertzeiten hervorgeht.) Wenn ein unstabiler Kern durch das Hinzufügen eines weiteren Neutrons oder Protons künstlich hergestellt wird, kann es zu einer Umwandlung in eine stabile Form kommen. Seltsam genug, diese Stabilisierung wird nicht dadurch vollzogen, daß ein Proton oder Neutron ausgestoßen wird, sondern dadurch, daß ein Positron oder ein Elektron austritt; man erkennt, daß im Kern selbst ein Proton in ein Neutron und ein Positron verwandelt wird (oder ein Neutron in ein Proton und ein Elektron); das geladene leichte Teilchen wird dann ausgestrahlt. Mit anderen Worten: die Massenzahl bleibt die gleiche, aber die Ordnungszahl ändert sich. Die Stabilitätsbedingungen sind nicht sehr empfindlich; vielmehr kann es für eine gegebene Massenzahl, d. h. eine gegebene Gesamtzahl von Protonen und Neutronen, *mehrere* stabile Gruppierungen von Protonen und Neutronen geben, meist drei oder fünf, und das bedeutet mehrere Isobare. Für eine gegebene Ordnungszahl, d. h. eine gegebene Anzahl Protonen, gibt es noch mehr Variationen möglicher Kerne, so daß einige von den schweren Elementen bis zu 10 oder 12 stabile Isotopen haben. Man hat ungefähr 250 verschiedene stabile Kerne zwischen den Massenzahlen 1 und 238 und den Ordnungszahlen 1 und 92 festgestellt.

1.25. Die hier gemachten Feststellungen beruhen alle auf experimentellen Ergebnissen. Aber die Theorie der Kernkräfte ist noch unvollständig; mit Hilfe der Quantenmechanik konnte man immerhin nicht nur die obengenannten Beobachtungen, sondern auch einzelne empirische Ergebnisse der künstlichen Radioaktivität deuten und ebenso die Unterschiede zwischen geraden und ungeraden Massenzahlen.

Künstliche Radioaktivität

1.26. Wir erwähnten die Aussendung von Positronen oder Elektronen während der Umgruppierung von Kernen, die so ihre Stabilisierung suchen. Mit der Elektronenemission (Beta-Strahlen) war man bereits beim Studium der natürlichen radioaktiven Substanzen vertraut geworden, dagegen war die Positronenemission bei diesen Substanzen nie gefunden worden. Tatsächlich beruht die oben gegebene allgemeine Darlegung offenbar auf Zusammenhängen, die hier nicht wiedergegeben werden können. Wir werden uns deshalb mit einem kurzen Bericht über die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität und über unser Wissen davon begnügen.

1.27. Im Jahre 1934 berichteten *Curie* und *Joliot,* daß gewisse leichte Elemente (Bor, Magnesium, Aluminium) nach Beendigung einer Beschießung mit Alpha-Partikeln weiterhin noch eine gewisse Zeit lang Positronen aussenden. Mit anderen Worten: das Alpha-Partikel-Bombardement erzeugte radioaktive Formen von Bor, Magnesium, Aluminium. *Curie* und *Joliot* maßen Halbwertszeiten von 14 Minuten, 2,5 Minuten und 3,25 Minuten für radioaktive Substanzen, die durch das Alpha-Teilchen-Bombardement erzeugt worden waren.

1.28. Dieses Resultat regte in der ganzen Welt zu ähnlichen Versuchen an. Im besonderen überlegte *E. Fermi,* daß Neutronen, weil ohne elektrische Ladung, besonders wirksam sein müßten in der Durchdringung von Kernen (weil sie ja nicht abgestoßen werden), vor allem von Kernen von hoher Ordnungszahl, die Protonen und Alpha-Teilchen abweisen. Es gelang ihm, seine Vermutung rasch als zutreffend nachzuweisen. Er fand nämlich, daß der Kern des bombardierten Atoms ein Neutron einfing, hierdurch unstabil wurde und aus Stabilisierungsgründen ein Elektron aussandte. Auf diese Weise war das Endglied der Verwandlung, der stabile Kern, um eine Einheit in der Massenzahl höher (durch Einfang des Neutrons) und um eine Einheit in der Ordnungszahl höher (durch Aussendung eines Elektrons) als der anfänglich bombardierte Kern.

1.29. Als Resultat von unzähligen seit 1934 angestellten Versuchen gelang es, radioaktive Isotope von fast jedem Element

des periodischem Systems zu erzeugen. Einige von diesen Isotopen kehren zur Stabilität zurück durch Emission eines Positrons, andere durch Emission eines Elektrons, einige durch den sogenannten K-Elektroneinfang[1], den wir nicht diskutieren wollen, und einige wenige (wahrscheinlich 3) durch Alpha-Emission. Insgesamt wurden ungefähr 500 unstabile Kernarten beobachtet, und für die meisten von ihnen konnten die Ordnungszahlen und Massenzahlen festgestellt werden.

1.30. Diese künstlichen radioaktiven Elemente spielen nicht nur eine wichtige Rolle in dem von uns zu besprechenden Projekt, sie haben auch eine kaum zu überschätzende Bedeutung in der Medizin, in der sogenannten Leuchtspurchemie[2] und in anderen Gebieten der Forschung.

ENERGETISCHE BETRACHTUNGEN

Die Bindungsenergie der Kerne

1.31. Bei der vorangegangenen Beschreibung der Radioaktivität und der Atomstruktur haben wir absichtlich quantitative Angaben vermieden und keine Anwendungen des Äquivalenzgesetzes zwische Masse und Energie erwähnt, obwohl wir dieses Gesetz als Leitprinzip des vorliegenden Berichtes angekündigt haben. Jetzt müssen wir von quantitativen Details sprechen, nicht mehr nur von den allgemeinen Prinzipien.

1.32. Wir berichteten von stabilen und unstabilen Kernen, die aus Kombinationen von Protonen und Neutronen gebildet sind und durch Kernkräfte zusammengehalten werden. Ein allgemeines Prinzip der Physik sagt, daß man Arbeit aufwenden muß, um ein stabiles System aufzubrechen. Folglich muß man Energie

---

[1] Es handelt sich um den von *Alvarez* 1937 entdeckten sogenannten K-Prozeß oder die inverse Betaumwandlung. Der Kern entnimmt zu seiner Stabilisierung ein Elektron aus einer Schale anstatt, wie im Text erwähnt, ein Positron auszusenden. Das gibt den gleichen Effekt: bei gleichbleibender Massenzahl geht die Kernladung, damit die Ordnungszahl, um eine Einheit zurück.

[2] «tracer» chemistry. Etwa künstlich radioaktives Jod läßt sich mit *physikalischen* Methoden auf seinem Weg verfolgen, z. B. seine Speicherung in der Schilddrüse. So u. a. auch radioaktives Na, radioaktives C, da sich diese aktivierten Isotope chemisch genau wie die nichtaktiven verhalten.

aufwenden, um eine stabile Kombination von Neutronen und Protonen in ihre Bausteine zu zerlegen. Wenn Energie und Masse tatsächlich Äquivalente sind, muß folglich die gesamte Masse (die also auch die Energie einschließt) eines stabilen Kerns kleiner sein als die Gesamtmasse der getrennten Protonen und Neutronen, die den Kern bilden. Diese Massendifferenz muß dann äquivalent sein der Energie, die nötig wäre, um den Kern vollständig zu zerlegen, und die man die Bindungsenergie nennt. Erinnern wir uns, daß die Masse aller Kerne «nahezu» geradzahlig ist. Die kleinen Abweichungen von der Geradzahligkeit sind hier von entscheidender Bedeutung.

1.33. Nehmen wir das Alpha-Partikel als Beispiel. Es ist stabil; da seine Massenzahl 4 und seine Ordnungszahl 2 ist, besteht es aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Die Masse eines Protons ist 1,00758 und die Masse eines Neutrons ist 1,00893 (vergleiche Anhang 2), so daß die Gesamtmasse der getrennten Komponenten des Heliumkerns folgenden Betrag hat:

$$2 \cdot 1{,}00758 + 2 \cdot 1{,}00893 = 4{,}03302,$$

während die Masse des Heliumkerns selbst nur 4,00280 beträgt. Vernachlässigen wir die letzten zwei Dezimalstellen, so haben wir 4,033 und 4,003, eine Differenz von 0,030 Masseneinheiten. Das stellt die Bindungsenergie der Protonen und Neutronen im Heliumkern dar. Der Betrag sieht klein aus, aber nach der Einsteinschen Gleichung $E = mc^2$ wissen wir, daß ein kleiner Massenbetrag einem großen Energiebetrag entspricht. In unserem Falle bedeuten 0,030 Masseneinheiten die Äquivalenz von $4{,}5 \cdot 10^{-5}$ Erg. pro Kern oder $2{,}7 \cdot 10^{19}$ Erg pro Mol Helium. In Einheiten, die dem Ingenieur oder Techniker vertraut sind, bedeutet das, daß die Zerlegung aller Heliumkerne in einem Gramm Helium $1{,}62 \cdot 10^{11}$ Gramm-Kalorien oder 190 000 Kilowattstunden Energie erfordern würde. Umgekehrt, wenn man freie Protonen und Neutronen in Heliumkerne vereinen könnte, würde der gleiche Energiebetrag frei.

1.34. Es ist offenbar der Mühe wert, die Möglichkeit zu untersuchen, Energie durch die Kombination von Protonen und Neutronen oder durch eine Kernverwandlung zu gewinnen. Wir wollen zunächst die heutigen Ergebnisse über die Bindungsenergie verschiedener Kerne überblicken.

Massenspektren und Bindungsenergie

1.35. Die chemischen Atomgewichtszahlen geben ein durchschnittliches Gewicht einer großen Zahl Atome eines gegebenen Elements. Ausgenommen der Fall, daß ein Element nur *ein* Isotop hat, entspricht das chemische Atomgewicht nicht der Masse eines einzelnen Atoms. Der Massenspektrograph, den *F. W. Aston* und andere aus der ursprünglichen Anordnung von *J. J. Thomson* entwickelte, hat gestattet, die Masse der einzelnen Isotope zu messen. Und tatsächlich waren es gerade diese Messungen, aus denen die Existenz der Isotope sicher hervorging und zugleich die Einsicht, daß in der Reihe der Atomgewichte die Masse jeder einzelnen Atomart (jedes Isotops) wirklich nahezu ganzzahlig ist. Diese experimentell festgestellten Zahlen sind die «Massenzahlen», die wir bereits definiert haben und die die Summe der Protonen und Neutronen in ihrem Kern angeben. Ihre Entdeckung trug wesentlich zu unserer heutigen Anschauung bei, daß alle Kerne aus Neutronen und Protonen aufgebaut sind.

1.36. Verbesserte Massenspektograph-Angaben, in einigen Fällen durch Kernreaktionsdaten ergänzt, lieferten genaue Ziffern der Bindungsenergien für viele Atome über den ganzen Bereich der Atommassen. Diese Bindungsenergie B ist die Differenz zwischen der wirklichen Kernmasse M und der Summe aller Kernprotonen und Kernneutronen in einem Kern. Das gibt:

$$B = (ZM_p + NM_n) - M,$$

worin M_p und M_n die Massen des Protons bzw. Neutrons sind, Z die Anzahl der Protonen, und $N = A - Z$ die Anzahl der Neutronen; M ist die wirkliche Masse des Kerns. Es ist noch besser, die relative Bindungsenergie, also die Bindungsenergie pro Partikel, B/A, ins Auge zu fassen als den Wert von B selbst. Ein solches Studium zeigt, daß, abgesehen von Schwankungen bei leichten Kernen, die allgemeine Kurve der Bindungsenergie pro Partikel[1] steil anwächst bis zu einem flachen Maximum bei ungefähr $A = 60$ (Nickel), um dann wieder allmählich abzusinken. Offenbar sind die Kerne in der Mitte des periodischen Systems mit Massenzahlen von 40—100 die am festesten gebundenen. Jede

[1] In der amerikanischen Literatur wird diese Größe: *b*inding *e*nergy *p*er *p*article öfters kurzweg «bepp» genannt.

Kernreaktion, durch welche die Teilchen in den resultierenden Kernen fester gebunden werden als die Teilchen in den Anfangskernen, gibt Energie frei. In der Sprache der Thermochemie sind das exothermische Reaktionen. Auf diese Weise würde man im allgemeinen Energie gewinnen durch Kombination leichter Kerne zu schwereren oder durch Zerspaltung sehr schwerer Kerne in zwei oder drei leichtere Bruchstücke. Außerdem gibt es eine Anzahl von speziellen Fällen exothermischer Aufspaltungen unter den ersten 10 oder 12 Elementen des periodischen Systems, bei denen die Bindungsenergie pro Teilchen sich unregelmäßig von einem Element zum andern ändert.

1.37. Bis jetzt mag es scheinen, als häuften wir eine Mutmaßung auf die andere. Zunächst nahmen wir an, daß Masse und Energie äquivalent seien. Jetzt nehmen wir noch an, daß die Atomkerne umgruppiert werden könnten unter Verminderung ihrer Gesamtmasse und unter Freisetzung von Energie, die man eventuell benutzen kann. Es ist Zeit, einige Experimente zu besprechen, die den physikalischen Beweis für die Richtigkeit dieser Annahmen liefern.

Experimenteller Beweis der Äquivalenz von Masse und Energie

1.38. Wir haben oben bemerkt, daß *Rutherfords* Entdeckung der künstlichen Kernverwandlung von 1919 Anlaß zu vielen ähnlichen Experimenten gegeben hat. Die stufenweise Verbesserung der Hochspannungstechnik machte es möglich, die künstlich erzeugten sehr schnellen Wasserstoff- oder Heliumionen an Stelle der natürlichen Alpha-Partikel zu benutzen. *J. D. Cockcroft* und *E. T. S. Walton* am Rutherford-Laboratorium haben zuerst Kernänderungen mit solchen Methoden erzeugt. Im Jahre 1932 bombardierten sie Lithium[1] mit Protonen von 700 Kilovolt Energie und fanden, daß Alpha-Teilchen als Folge dieses Bombardements vom Lithium ausgestrahlt wurden. Diese Kernreaktion kann man symbolisch so darstellen:

[1] Im englischen Text steht hier (wie an anderen ähnlichen Stellen) das Wort target, d. i. Ziel, Scheibe. Gemeint ist das bombardierte Objekt ohne Rücksicht auf seine Form. Manchmal ist dieses Objekt wirklich scheibenförmig. Deswegen ist auch das Wort «Scheibe» gelegentlich verwendet.

$${}_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4$$

Hierin bedeuten die tiefstehenden Indices die positiven Ladungen des Kerns (Ordnungszahlen oder Atomnummern) und die hochstehenden Indices die Anzahl der Masseteilchen im Kern, also die Massenzahlen. Wie in einer chemischen Gleichung müssen die Beträge der Indices rechts und links gleich sein. In unserem Beispiel sind die Beträge der tiefstehenden Indices 4 und der hochstehenden 8 auf beiden Seiten der Gleichung.

1.39. Diese Gleichung enthält aber weder die Masse noch die Energie. Im allgemeinen wird das in den Kern eindringende Proton und das ausgetoßene Alpha-Teilchen auch kinetische Energie haben. Die Masse von zwei Alpha-Partikelchen wird auch nicht genau gleich sein der Summe der Massen von einem Proton- und einem Lithiumatom. In Übereinstimmung mit unserer Theorie muß aber die Summe von Massen und Energien vor und nach der Reaktion dieselbe sein. Die Massen kennt man von den Massenspektrogrammen. Auf der linken Seite der Gleichung ($L^7 + H^1$) haben wir insgesamt 8,0241, auf der rechten Seite ($2He^4$) 8,0056, so daß 0,0185 Masseneinheiten bei der Reaktion verschwunden sind. Die experimentell festgestellten Energien der Alpha-Teilchen betrugen annähernd 8,5 Millionen Elektronvolt für jedes Teilchen, eine Zahl, mit der verglichen die kinetische Energie des einfallenden Protons vernachlässigt werden kann. Folglich sind 0,0185 Masseneinheiten verschwunden und 17 Mev kinetische Energie sind erschienen. 0,0185 Masseneinheiten sind $3{,}07 \cdot 10^{-26}$ Gramm, 17 Mev sind $27{,}2 \cdot 10^{-6}$ Erg und c ist $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec (siehe Anhang 2). Setzen wir diese Zahlen in Einsteins Gleichung $E = mc^2$, dann bekommen wir links $27{,}2 \cdot 10^{-6}$ Erg, und rechts haben wir $27{,}6 \cdot 10^{-6}$ Erg, so daß die Gleichung mit befriedigender Annäherung erfüllt ist. Mit anderen Worten, diese experimentellen Resultate beweisen, daß die Äquivalenz von Masse und Energie von Einstein richtig erkannt worden ist.

KERNREAKTIONEN

Methoden des Kernbombardements

1.40. *Cockcroft* und *Walton* erzeugten Protonen von ziemlich hoher Energie durch Ionisierung von Wasserstoffgas und Be-

schleunigung der Ionen in einem Hochspannungsapparat mit Transformator und Gleichrichter. Ein ähnliches Verfahren kann man benutzen, um Deuteronen von hoher Energie aus Deuterium oder Alpha-Teilchen von hoher Energie aus Helium zu gewinnen. Noch höhere Energien kann man erreichen, wenn man die Ionen in Cyclotronen oder Van de Graaff-Generatoren beschleunigt. Jedoch um Gamma-Strahlen von hoher Energie zu bekommen oder, was das Wichtigste ist, Neutronen zu erhalten, muß man Kernreaktionen selber als Quelle benutzen. Strahlungen von genügend hoher Energie werden von gewissen natürlichen radioaktiven Materialien oder von gewissen Bombardements geliefert. Neutronen werden gewöhnlich erzeugt durch Bombardierung von bestimmten Elementen, vor allem Beryllium oder Bor, durch natürliche Alpha-Teilchen oder durch Bombardierung geeigneter Objekte[1] mit Protonen oder Deuteronen. Die meist verwendete Quelle für Neutronen ist eine Mischung von Radium und Beryllium, worin die Alpha-Partikel des Radiums und seiner Abbauprodukte die Be^9-Kerne durchdringen; diese geben dann Neutronen ab und werden stabile C^{12}-Kerne (gewöhnlicher Kohlenstoff). Eine häufig benutzte Strahlenquelle für Neutronen besteht in der Beschießung von Eis aus schwerem Wasser durch beschleunigte Deuteronen. Hier treffen die schnellen Deuteronen die Deuteronen im Objekt[1] (im schweren Wasser) und erzeugen Neutronen und He^3-Kerne. Ein halbes Dutzend anderer Reaktionen mit Deuterium, Lithium, Beryllium oder Bor als Objekte werden gleichfalls benutzt. Wir merken uns, daß in all diesen Reaktionen die gesamte Massenzahl und die gesamte Ladungszahl unverändert bleiben.

1.41. Zusammengefaßt: Die Mittel, die man fand, um Kernreaktionen einzuleiten, sind ungefähr in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit: Neutronen, Deuteronen, Protonen, Alpha-Partikel, Gamma-Strahlen und in Einzelfällen schwerere Teilchen.

Resultate der Kernbeschiessung

1.42. Die meisten Atomkerne können von mindestens einem Typ von Atomgeschossen (oder von der Gamma-Strahlung) durchdrungen werden. Jede solche Durchdringung kann zu einer Kern-

[1] «target», vergl. vorherige Fußnote.

umgruppierung führen, in deren Verlauf ein Grundpartikel ausgestrahlt wird oder Strahlung ausgesandt wird oder auch beides geschieht. Der resultierende Kern kann einer der natürlichen stabilen Kerne sein oder — und dies ist wahrscheinlicher — er kann ein anderer Atomtyp sein, der radioaktiv ist und eventuell sich weiter in einen anderen Kern umwandelt. Dieser kann wieder radioaktiv sein, und dann wird er wieder zerfallen. Dieser Prozeß geht weiter, bis alle Kerne in einen stabilen Typus übergegangen sind. In zwei Beziehungen unterscheiden sich diese künstlichen radioaktiven Substanzen von den natürlichen. Viele von ihnen verwandeln sich unter Positronenausstrahlung (die bei natürlicher Radioaktivität nicht beobachtet wird), und sehr wenige von ihnen senden Alpha-Teilchen aus. In jedem dieser Fälle wurde, wenn man genaue Messungen machte, die Äquivalenz von Masse und Energie festgestellt und der Gesamtbetrag von Masse-Energie als konstant nachgewiesen (manchmal muß man Neutrinos heranziehen, um die Bedingung der Massen-Energie-Erhaltung zu erfüllen).

Bezeichnung

1.43. Eine vollständige Beschreibung einer Kernreaktion muß die Natur, Masse und Energie des einfallenden Partikels, desgleichen die Natur (Massenzahl und Ordnungszahl), Masse und Energie (diese gewöhnlich = null) des Objektpartikels (des getroffenen Partikels), ferner die Natur, Masse und Energie des ausgestoßenen Teilchens oder der Strahlung enthalten und schließlich noch die Natur, Masse und Energie des übrigbleibenden Teilchens. Aber man kennt oft nicht alles, und für viele Zwecke ist die vollständige Beschreibung auch nicht nötig. Häufig beschreibt man eine Kernreaktion durch eine Bezeichnung, die zuerst das Zielteilchen durch sein chemisches Symbol und, wenn man sie kennt, seine Massenzahl bestimmt, dann das Projektil, dann das ausgesandte Teilchen und endlich den Rest. In diesem Schema wird das Neutron durch den Buchstaben n, das Proton durch p, das Deuteron durch d, das Alpha-Partikel durch α und das Gamma-Partikel durch γ bezeichnet. Auf diese Weise kann die Radium-Beryllium-Neutronenreaktion geschrieben werden: Be^9 (α, n) C^{12} und die Deuteron-Deuteron-Reaktion: H^2 (d, n) He^3.

REAKTIONSTYPEN

1.44. Überlegt man, daß es fünf verschiedene Partikel gibt (n, p, d, α, γ), die sowohl für die Beschießung als auch für die dadurch hervorgerufene Ausstrahlung in Frage kommen, so könnte man erwarten, fünf mal fünf, also 25 verschiedene Kombinationen zu finden. In Wirklichkeit kommt aber das Deuteron als ausgestrahltes Partikel sehr selten vor und das Photon (Gamma-Strahlen) leitet nur zwei Reaktionstypen ein. Dagegen gibt es einige andere Reaktionstypen wie (n, 2n) [d. h. also Einfangen eines Neutrons, Ausstoßen von zwei Neutronen], (d, H^3) [also Beschießung mit einem Deuteron, Ausstoßen des seltenen Isotops H^3], und Atomspaltung; dadurch kommen die im ganzen bekannten Reaktionstypen auf ungefähr 25. Vielleicht sollte die (n, γ)-Reaktion besonders erwähnt werden wegen ihrer besonderen Bedeutung bei einem unsere Darlegung betreffenden Prozeß. Man nennt ihn häufig «radiative capture» (etwa «Strahlungseinfang»), weil das Neutron im Kern bleibt und nur ein γ-Strahl austritt.

WAHRSCHEINLICHKEIT UND WIRKUNGSQUERSCHNITT

1.45. Bis jetzt haben wir nicht von der Wahrscheinlichkeit einer Kernreaktion gesprochen. Tatsächlich schwankt diese Wahrscheinlichkeit in weiten Grenzen. Es ist keineswegs sicher, daß ein auf einen Kern losgeschossenes Neutron oder Proton wirklich in ihn eindringt. Das hängt sowohl von dem Kern ab als von dem stoßenden Partikel. In der Kernphysik drückt man die Wahrscheinlichkeit eines Reaktionsereignisses durch den Wirkungsquerschnitt aus. Die Atomzentren in einer dünnen Folie kann man statistisch betrachten als Punkte, die gleichmäßig über eine Ebene verteilt sind. Das Zentrum eines Atomprojektils, das diese Fläche trifft, hat geometrisch eine endliche Wahrscheinlichkeit, in einer bestimmten Distanz (r) an einem dieser Punkte vorbeizugehen. Wenn nämlich in einem Gebiet A n Atomzentren liegen, so ist diese Wahrscheinlichkeit gleich $n\pi r^2/A$; das bedeutet einfach das Verhältnis der Summe aller n Kreisflächen mit dem Radius r, die man um die Punkte (Atomzentren) der ganzen Fläche gelegt denken kann, zu dieser Fläche

A. Wenn wir uns die Atome als undurchdringliche Stahlscheibchen denken und die auftreffenden Partikel als Kügelchen von verschwindend kleinem Durchmesser, dann bedeutet dieses Verhältnis die Wahrscheinlichkeit, daß das Kügelchen ein Stahlscheibchen trifft, das heißt, daß das Atomprojektil durch die Folie aufgehalten wird[1]. Mißt man denjenigen Anteil der auftreffenden Teilchen, der durch die Folie hindurchgeht, so kann man das Resultat der Messung gleichwohl durch den äquivalenten Wirkungsquerschnitt der Atome ausdrücken. Dieser letztere Begriff kann ausgedehnt werden auf jede Wirkung zwischen den eingestrahlten Teilchen und den Atomen des Objekts. So kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit, daß ein Alpha-Partikel, das in Beryllium eindringt und ein Neutron erzeugt, ausgedrückt werden als äquivalenter Wirkungsquerschnitt des Berylliums für diese Reaktionsart.

1.46. In der Kernphysik ist es möglich, den Durchmesser der eingeschossenen Partikel zu vernachlässigen. Die technische Definition des Wirkungsquerschnitts für jeden Kernprozeß ist infolgedessen:

$$\frac{\text{Zahl der Treffer}^{(2)}}{\text{Gesamtzahl der einfallenden Teilchen}} = (\text{Zahl der Atomkerne pro cm}^2 \text{ des Objekts}) \cdot (\text{Wirkungsquerschnitt pro cm}^2)$$

[1] Vielleicht läßt sich das Gesagte noch leichter auf folgende Weise einsehen: eine Fläche von der Größe A sei mehr oder weniger dicht besetzt mit n Atomzentren. Dann ist die Besetzungsdichte, d. h. die Besetzung pro cm^2 der Fläche n/A. Die Fläche, die von den Atomen *selbst* bedeckt ist bei einem Atomradius r, beträgt, wenn man sich den Atomquerschnitt kreisförmig denkt, für jedes Atom $r^2\pi$, also für einen cm^2:

$$a = \frac{n\, r^2 \pi}{A} = \frac{a}{1}$$

Dies ist zugleich das Verhältnis der besetzten Fläche a zur Fläche 1 cm^2, also a : 1. Damit hat sie die Bedeutung der Wahrscheinlichkeit des Treffens, die man Wirkungsquerschnitt nennt. Andererseits ist dieser Wert durch Messung, also empirisch, feststellbar. Nennt man die Anzahl der tatsächlichen Treffer t und die Gesamtzahl der auf das Objekt (target) abgeschossenen Teilchen z, also das Verhältnis der Kerntreffer zur Gesamtzahl der Geschosse t/z, so ist dieses Verhältnis gleich dem obengenannten Ausdruck

$$\frac{t}{z} = \frac{n\, r^2 \pi}{A} = a$$

[2] Englisch: of processes occuring (der eintretenden Prozesse).

Man merke sich, daß diese Definition für den Wirkungsquerschnitt pro einzelnen Kern gilt. Man kann Wirkungsquerschnitte für jede Art von Prozessen definieren, so für Einfangen von Teilchen, für ihre Streuung, für die Erzeugung von Neutronen usw. In vielen Fällen wird die Zahl der bei einem Kernprozeß ausgesandten oder gestreuten Teilchen nicht direkt gemessen; vielmehr mißt man nur die in einem parallelen Bündel einfallender Teilchen erzeugte Abschwächung, die durch Einschaltung einer Schicht eines Meßstoffs von bekannter Dicke zustandekommt. Der so vermittelte Wirkungsquerschnitt heißt *Gesamtwirkungsquerschnitt* und wird gewöhnlich mit dem griechischen Buchstaben σ bezeichnet[1].

1.47. Wie in § 1.11 angegeben, ist der Kerndurchmesser d von der Größenordnung 10^{-12} cm. Infolgedessen erwartet man, daß der Wirkungsquerschnitt für Kernreaktionen von der Größenordnung πr^2 oder $\pi d^2/4$, also rund 10^{-24} cm^2 beträgt, und das ist auch die Einheit, in der man gewöhnlich den Wirkungsquerschnitt ausdrückt. Tatsächlich variieren die beobachteten Wirkungsquerschnitte enorm. So beträgt der Wirkungsquerschnitt bei (n, γ)-Prozessen für langsame Neutronen in manchen Fällen $1000 \cdot 10^{-24}$ cm^2, während der Wirkungsquerschnitt für Kernumwandlung durch γ-Strahlenabsorption bei etwa $(1/1000) \cdot 10^{-24}$ cm^2 liegt.

ANWENDUNGSMÖGLICHKEIT DER ATOMENERGIE IM JAHRE 1939

EXPERIMENTE IM KLEINEN MASSTABE

1.48. Wir haben etwas oberflächlich über die Äquivalenz von Masse und Energie und über Kernreaktionen gesprochen, wie beispielsweise über diejenigen bei Protonenbeschuß des Lithiums, wobei Energie in relativ großem Maße frei wurde. Jetzt wollen wir fragen, warum man nicht überall in der Welt in den dreißiger Jahren Atomenergiewerke baute. Wenn wir $2{,}76 \cdot 10^{-5}$ Erg von jedem Atom Lithium freimachen können, das durch ein Pro-

[1] Der Name hat seinen Sinn dadurch, daß bei einer solchen Messung alle Schwächungsursachen, also Absorption, normale und anormale Streuung beteiligt sind.

ton getroffen wird, können wir erwarten, annähernd eine halbe Million Kilowattstunden zu bekommen, wenn wir ein Gramm Wasserstoff mit sieben Gramm Lithium vereinigen. Das scheint besser zu sein, als Kohle zu verbrennen. Aber die Schwierigkeit liegt in der Erzeugung sehr schneller Protonen und in der Beherrschung der erzeugten Energie. Alle früher erwähnten Experimente wurden mit winzigen Mengen von Material ausgeführt, zwar natürlich mit sehr vielen Atomen, aber mit winzigen Massen, wenn wir hierfür den gewöhnlichen Ausdruck verwenden; also nicht mit Tonnen oder Pfunden oder Grammen, sondern nur mit Bruchteilen von Mikrogrammen (Mikrogramm=1/1 000 000 gr $= 10^{-6}$ gr). Der Aufwand an Energie bei diesen Experimenten war immer viel größer als der Energiebetrag, der bei den herbeigeführten Kernreaktionen herauskam.

1.49. Neutronen sind besonders wirksam für die Herbeiführung von Kernabbau. Warum wurden sie nicht benutzt? Wenn man zur Erzeugung der Neutronen Ionenbündel auf ein geeignetes Ziel auftreffen ließ, so machten sich die Begrenzungen bemerkbar, die in dem vorangegangenen Paragraphen erörtert wurden. Wollte man aber Radium oder Beryllium als Erzeugungsquelle benutzen, so machte sich die Seltenheit des Radiums erschwerend bemerkbar.

Die Notwendigkeit einer Kettenreaktion

1.50. Unsere allgemeinen Energiequellen sind, von Sonnenstrahlen und Wasserkraft abgesehen, chemische Reaktionen, gewöhnlich die Verbrennung von Kohle oder Öl. Sie liefern Energie nach außen als Resultat von Umgruppierungen in der äußeren Atomelektronen-Struktur, von einem Prozeß, der auch die Energie unserer Körper liefert. Verbrennung breitet sich immer von selbst aus; so gibt das Anzünden eines Feuers mit einem Zündholz genug Wärme frei, um das benachbarte Brennmaterial anzuzünden; dadurch wiederum wird noch mehr Wärme frei, die abermals mehr Brennmaterial entzündet usw. Bei den Kernreaktionen, die wir beschrieben haben, findet das im allgemeinen nicht statt. Weder die freigegebene Energie noch die dabei auftretenden neuen Partikel genügen, um die Reaktion aufrechtzuerhalten. Jedoch können wir uns Kernreaktionen vorstellen, die

Teilchen von der gleichen Art entstehen lassen, wie diejenigen es sind, durch die die Reaktion eingeleitet wurde. Ist das in genügender Menge der Fall, so kann sich die Reaktion auf benachbarte Teilchen gleicher Art ausbreiten. Eine solche sich selbst ausbreitende Reaktion nennt man *Kettenreaktion,* und derartige Bedingungen müssen gegeben sein, um die Energie der Kernreaktionen, mit der wir uns befassen, in einem großen Ausmaß nutzbar zu machen.

Periode der Spekulation

1.51. Obwohl man in den dreißiger Jahren noch keine Atomenergieanlagen gebaut hatte, gab es eine Menge Entdeckungen in der Kernphysik und eine Fülle von Spekulationen. *H. Bethe* stellte eine Theorie auf, um die Sonnenwärme durch einen Zyklus von Kernänderungen von Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff zu erklären, die schließlich zur Bildung von Helium führen[1]. Diese Theorie ist jetzt allgemein akzeptiert. Die Entdeckung von einigen (n, 2n)-Kernreaktionen, d. h. also von durch Neutronen erzeugten und Neutronen erzeugenden Reaktionen, legte den Gedanken nahe, daß man bei richtigen Versuchsbedingungen eine sich selbst vermehrende Kettenreaktion in Gang setzen könne. So gab es viele Gespräche über Atomenergie und einige über Atombomben. Aber der letzte große Schritt vorwärts in dieser Vorbereitungszeit erfolgte erst nach vier Jahren des Herumsuchens. Die Wirkungen des Neutronenbombardements auf Uranium, das komplizierteste bekannte Element, war von einigen der tüchtigsten Physiker studiert worden. Die Resultate waren aufregend, aber auch verwirrend. Die Erzählung ihrer allmählichen Deutung ist kompliziert und hochgradig fachlicher

---

[1] Die Serie der von Bethe vorgeschlagenen Reaktionen:

$$
\begin{aligned}
&(1)\ {}_6C^{12} + {}_1H^1 \rightarrow {}_7N^{13}\\
&(2)\ {}_7N^{13} \rightarrow {}_6C^{13} + {}_1e^0\\
&(3)\ {}_6C^{13} + {}_1H^1 \rightarrow {}_7N^{14}\\
&(4)\ {}_7N^{14} + {}_1H^1 \rightarrow {}_8O^{15}\\
&(5)\ {}_8O^{15} \rightarrow {}_7N^{15} + {}_1e^0\\
&(6)\ {}_7N^{15} + {}_1H^1 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_2He^4
\end{aligned}
$$

Der Endeffekt ist die Umwandlung von Wasserstoff in Helium und Positronen (die als ${}_1e^0$ bezeichnet sind) und die Befreiung von ungefähr 30 Millionen Elektronenvolt Energie pro He-Atom.

Natur, eine faszinierende Geschichte von Theorie und Experiment. Wir übergehen die früheren unzulänglichen Erklärungen und bringen nur die schließlich gefundene und, wie es oft geht, verhältnismäßig einfache.

ENTDECKUNG DER URANIUMSPALTUNG

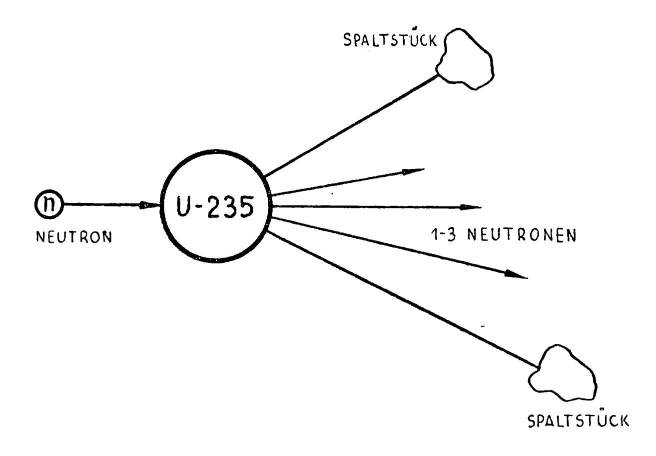
1.52. Es wurde schon erwähnt, daß Neutronen sich als die wirksamsten Teilchen für die Einleitung von Kernänderungen erwiesen haben. Das trifft besonders zu für Elemente von höchsten Atomnummern und Atomgewichten, bei denen die hohe positive Kernladung eine starke abstoßende Kraft auf Deuteronen- und Protonenprojektile, nicht aber auf die ungeladenen Neutronen ausübt. Die Resultate der Neutronenbombardierung des Uraniums erwiesen sich als interessant und verwirrend. Zuerst von *Fermi* und seinen Mitarbeitern im Jahre 1934 untersucht, konnten sie doch erst einige Jahre später richtig gedeutet werden.

1.53. Am 16. Januar 1939 kam *Niels Bohr* aus Kopenhagen, Dänemark, nach Princeton, N. J., um sich dort einige Monate aufzuhalten und insbesondere mit *Einstein* theoretische Probleme zu besprechen. (Vier Jahre später entkam Bohr in einem kleinen Boot aus dem von den Nazis besetzten Dänemark.) Kurz bevor Bohr Dänemark verließ, hatten zwei seiner Kollegen, *O. R. Frisch* und *L. Meitner* (beide Flüchtlinge aus Deutschland) ihm die Vermutung mitgeteilt, daß die Neutronenabsorption durch Uraniumkerne manchmal Kernspaltungen mit annähernd gleichgroßen Teilen herbeiführe, wobei eine enorme Energie freigegeben werde, ein Prozeß, den man bald Kernspaltung nannte. Der Anlaß zu dieser Hypothese war die wichtige Entdeckung von *O. Hahn* und *F. Straßmann* in Deutschland (veröffentlicht in den «Naturwissenschaften» Anfang Januar 1939)[1], die zeigte, daß bei dem Neutronenbombardement des Uraniums ein Barium-Isotop auftrat. Sofort nach seiner Ankunft in den Vereinigten Staaten teilte Bohr diesen Gedanken seinem früheren Schüler *J. A. Wheeler* und an-

---

[1] O. Hahn und F. Straßmann, Naturwissenschaften 27. 1939. Vergl. ferner: Dieselben «Über das Zerplatzen des Urankerns durch langsame Neutronen», Abhandlungen der preuß. Akad. d. Wissenschaften 1939, Math.-naturw. Klasse N. 12. Vorgetragen in der Sitzung vom 25. Mai 1939.

deren in Princeton mit. Die Sache verbreitete sich von Mund zu Mund und Physiker in der Nachbarschaft, darunter *E. Fermi* an der Columbia Universität, hörten davon. Als Ergebnis einer Besprechung zwischen *Fermi, J. R. Dunning* und *G. B. Pegram* begann man an der Columbia Universität eine Untersuchung über die starken Ionisationsstöße, die man von den herumfliegenden Trümmern des gespaltenen Uraniumkerns erwarten mußte. Am 26. Januar 1939 fand eine Konferenz über theoretische Physik



in Washington, D. C., statt, unter den Auspizien der George Washington Universität und des Carnegie Instituts in Washington. Fermi verließ New York, um der Zusammenkunft beizuwohnen, bevor die Spaltungsexperimente in Columbia in Gang gekommen waren. Auf dieser Zusammenkunft erörterten *Fermi* und *Bohr* das Problem der Spaltung, und speziell Fermi erwähnte die Möglichkeit, daß bei diesem Prozeß Neutronen emittiert werden könnten. Obwohl dies nur eine Vermutung war, war es klar, daß sie die Möglichkeit einer Kettenreaktion einschloß. Eine Menge sensationeller Aufsätze wurden über dieses Thema in der Presse veröffentlicht. Noch vor Schluß der Konferenz in Washington begannen einige andere Experimente, um die Kernspaltung zu bestätigen, und es wurden Nachrichten über positive Ergeb-

nisse von vier Laboratorien (Columbia University, Carnegie Institution of Washington, Johns Hopkins University, University of California) in der Ausgabe der *Physical Review* vom 15. Februar 1939 veröffentlicht. Zu der gleichen Zeit hörte *Bohr*, daß ähnliche Experimente in seinem Laboratorium in Kopenhagen gemacht wurden (ein Brief hierüber von *Frisch* an die *Nature*, datiert vom 16. Januar 1939, erschien in der Ausgabe vom 18. Februar). *F. Joliot* veröffentlichte in Paris am 30. Januar 1939 in den *Comptes-Rendus* seine ersten Resultate. Von dieser Zeit an gab es einen ständigen Zustrom von Veröffentlichungen über die Spaltung, so daß bis 6. Dezember 1939 etwa 100 Aufsätze vorlagen, über die *L. A. Turner*, Princeton, einen Übersichtsaufsatz in der Zeitschrift *Reviews of Modern Physics* schrieb. Eine vollständige Übersicht und Diskussion dieser Aufsätze findet sich in Turners Artikeln und auch an anderer Stelle.

Allgemeine Diskussion der Spaltung

1.54. Wir überlegen den Gedanken von *Frisch* und *Meitner* im Lichte der beiden charakteristischen Züge der Kernstruktur, daß nämlich erstens das Verhältnis der Neutronen[1] mit der Ordnungszahl ansteigt und daß zweitens die Bindungsenergie pro Partikel für die Kerne mittlerer Ordnungszahl ein Maximum erreicht. Nehmen wir an, der U-238-Kern sei genau in zwei Hälften zerbrochen; wenn wir die Masse des einfallenden Neutrons vernachlässigen, ergeben sich zwei Kerne von der Ordnungszahl 46 und der Massenzahl 119. Aber das schwerste stabile Isotop von Palladium ($Z = 46$) hat eine Massenzahl von nur 110. Infolgedessen müßte jeder dieser beiden angenommenen Teilkerne neun Neutronen ausstrahlen, um stabil zu werden, also um in diesem Fall einen $_{46}Pd^{110}$-Kern zu bilden; oder vier Neutronen in jedem Kern müßten sich unter Aussendung je eines Elektrons in Protonen verwandeln und dabei stabile Zinnkerne von der Massenzahl 119 und der Atomnummer 50 bilden; oder es müßte eine Kombination von solchen Ausstrahlungen und Umwandlungen stattfinden, um einige andere Paare stabiler Kerne entstehen zu lassen. Tat-

[1] Das Verhältnis der Anzahl der Neutronen zur Gesamtzahl der Teilchen (Massenzahl) eines Kerns, also N/A (vergl. 1.24).

sächlich findet nach Hahn und Straßmann, die als ein Spaltprodukt Barium ($Z = 56$, $A = 135$ bis 145) identifiziert hatten, die Spaltung so statt, daß zwei ungleiche Teile mit den Massenzahlen etwa 140 und 90, verbunden mit der Emission von einigen Neutronen und darauffolgendem radioaktivem Zerfall durch Elektronenemission, entstehen, die sich dann bis zu stabilen Kernen abbauen. Die Berechnungen der Bindungsenergie zeigen, daß jede derartige Umgruppierung eine Gesamtmasse ergibt, die erheblich kleiner ist als die Anfangsmasse des Uraniumkerns, daß also ein großer Betrag von Energie freigegeben wird.

1.55. Offenbar folgen aus dem Spaltungsphänomen drei wichtige Ergebnisse: die Freigabe von Energie, die Erzeugung von radioaktiven Atomen und die Möglichkeit einer Neutronenkettenreaktion. Die freigewordene Energie konnte sich dabei als kinetische Energie der Spaltstücke und im darauffolgenden radioaktiven Abbau der Produkte offenbaren. Die Möglichkeit einer Neutronenkettenreaktion hängt davon ab, ob tatsächlich Neutronen bei der Aufspaltung ausgesandt werden, was besonders untersucht werden mußte.

1.56. Das waren die Probleme, die sich aus der Entdeckung der Atomspaltung ergaben. Sie wurden in den Zeitschriften von 1939 und 1940 dargelegt, jedoch seitdem in großem Umfang geheim untersucht. Das Studium des Spaltprozesses selbst einschließlich der Erzeugung der Neutronen und schnellen Teilchen wurde in großem Umfang von Physikern mit Zählern, Nebelkammern und mit anderen Methoden durchgeführt. Dagegen wurde das Studium und die Bestimmung der Spaltprodukte größtenteils von Chemikern besorgt, die chemische Trennungen selbst mit submikroskopischen Materialmengen rapid durchführen mußten und wiederholt die Halbwertszeiten der unstabilen Isotope zu bestimmen hatten. Wir wollen den Stand der Kenntnisse vom Juni 1940 zusammenfassen. Damals war die Hauptsache über Kernspaltung entdeckt und der wissenschaftlichen Mitwelt mitgeteilt worden. Man hatte noch keine Kettenreaktion machen können, aber ihre Möglichkeit, wenigstens im Prinzip, war klar gegeben, und mehrere Wege zu ihrer Realisierung wurden angeregt.

STAND DER KENNTNISSE JUNI 1940

Endgültige und allgemein bekannte Ergebnisse der Kernspaltung

1.57. Die folgenden Tatsachen waren im Juni 1940 hier und im Ausland allgemein bekannt:

(1) Daß drei Elemente, nämlich Uranium, Thorium und Protoactinium, wenn man sie mit Neutronen bombardiert, manchmal in nahezu gleiche Bruchstücke aufsplittern und daß diese Spaltstücke Isotope von Elementen mittlerer Ordnungszahlen sind, zwischen Selen ($Z = 34$) und Lanthan ($Z = 57$).

(2) Daß die meisten dieser Spaltstücke unstabil sind und radioaktiv zerfallen und dabei unter fortgesetzter Emission von Beta-Teilchen über eine Serie von radioaktiven Zwischenelementen in verschiedene stabile Endformen übergehen.

(3) Daß diese Spaltstücke sehr große kinetische Energie besitzen.

(4) Daß die Spaltung von Thorium und Protoactinium nur mit schnellen Neutronen möglich ist. (Geschwindigkeiten in der Größenordnung von Tausenden von Meilen in der Sekunde.)

(5) Daß die Uraniumspaltung durch schnelle oder durch langsame sogenannte thermische Neutronen herbeigeführt werden könne[1]; speziell daß thermische Neutronen in dem Isotop U-235 Spaltungen herbeiführen, aber nicht in dem anderen U-238, ferner daß schnelle Neutronen eine geringere Wahrscheinlichkeit (kleineren Wirkungsquerschnitt) für Spalteffekte in U-235 haben als thermische Neutronen.

(6) Daß für bestimmte Neutronengeschwindigkeiten ein großer Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang durch U-238 besteht, wobei U-239 (Isotop) erzeugt wird, aber keine Kernspaltung stattfindet.

(7) Daß die Energie, die bei der Spaltung eines Urankerns frei wird, von der Größenordnung 200 Millionen Elektronvolt ist.

---

[1] «Thermische» Neutronen werden solche genannt, die sich mit der Geschwindigkeit von Gasmolekülen bei üblichen Temperaturen bewegen. Das ist einige Hundert bis einige Tausend Meter pro Sekunde und entspricht nur sehr kleinen Bruchteilen von 1 Elektronvolt Energie.

(8) Daß sehr schnelle Neutronen beim Spaltprozeß ausgesandt werden.

(9) Daß die durchschnittliche Zahl der hierbei ausgelösten Neutronen etwa zwischen eins und drei beträgt.

(10) Daß sehr schnelle Neutronen bei unelastischen Stößen auf Urankerne ohne jede Kernreaktion Energie einbüßen können.

(11) Daß die meisten dieser Ergebnisse mit der halbempirischen Theorie der Kernstruktur von *Bohr-Wheeler*[1] und anderen übereinstimmen; daraus ließ sich erwarten, daß Voraussagen aus dieser Theorie aussichtsreich seien.

Vermutungen hinsichtlich der Plutoniumspaltung

1.58. Man hatte festgestellt, daß Strahlungseinfang von Neutronen durch U-238 wahrscheinlich zu zwei aufeinanderfolgenden Beta-Emissionen führt mit dem Ergebnis der Bildung eines Kerns mit $Z = 94$ und $A = 239$. Überlegungen auf Grund der *Bohr-Wheelerschen* Spalttheorie und auf Grund einiger empirischer Beziehungen zwischen den Kernen, die *L. A. Turner* und andere anstellten, legten nahe, daß der so entstandene Kern ein ziemlich stabiler Alpha-Strahler sei, und daß er wahrscheinlich durch Bombardierung mit thermischen Neutronen spaltbar sei. Später wurde die Wichtigkeit einer solchen Spaltung durch thermische Neutronen für die Aufrechterhaltung einer Kernreaktion in privaten Korrespondenzen und Diskussionen angedeutet. Nach unserem heutigen Wissen und in der gegenwärtigen Weise ausgedrückt, sieht diese Reaktion so aus:

$$_{92}U^{238} + {_0n^1} \rightarrow {_{92}U^{239}} \rightarrow {_{93}Np^{239}} + {_{-1}e^0}$$
$$_{93}Np^{239} \rightarrow {_{94}Pu^{239}} + {_{-1}e^0},$$

wobei Np und Pu die neuen chemischen Symbole sind, die für die neuen Elemente Neptunium und Plutonium jetzt gebraucht werden; $_0n^1$ bedeutet das Neutron und $_{-1}e^0$ ein gewöhnlich nega-

---

[1]Die wichtigste Arbeit «The Mechanism of Nuclear Fission» von Bohr und Wheeler erschien am 1. September 1939 in Bd. 56, S. 426 bis 455 der «Physical Review». Der Inhalt kann in einer Fußnote nicht skizziert werden. Eine verständliche Darstellung der Grundzüge der Kernspaltung ist im 8. Kapitel des Buches «Atomenergie» (2. Aufl., Verlag Walter & Co., Olten 1947) gegeben.

tives Elektron. Plutonium 239 ist der Kern, von dem man richtig vermutete, daß er durch thermische Neutronen spaltbar sei. Darüber mehr in den folgenden Kapiteln.

Allgemeiner Stand der Kernphysik

1.59. Im Jahre 1940 waren die Kernreaktionen seit mehr als zehn Jahren bereits eingehend studiert worden. Mehrere Bücher und Übersichtsaufsätze über Kernphysik waren veröffentlicht. Man hatte neue Methoden zur Erzeugung und Beeinflussung der Kernprojektile entdeckt, ebenso für das Studium der künstlichen Radioaktivität und für die Trennung submikroskopischer Mengen der chemischen Elemente, die bei Kernreaktionen entstehen. Auch hatte man die Massen der Isotope genau gemessen. Messungen über den Wirkungsquerschnitt des Neutronenfangs waren angestellt, ebenso Methoden, um die Geschwindigkeit der Neutronen zu verringern. Es hatten sich auch physiologische Wirkungen der Neutronen herausgestellt; diese hatte man sogar bei der Krebsbehandlung anzuwenden versucht. Alle diese Informationen standen jedermann zur Verfügung, aber sie waren in hohem Grade unvollständig. Es gab viele Lücken und viele Ungenauigkeiten. Die Technik war schwierig und die zur Verfügung stehenden Materialmengen oft nur submikroskopisch. Obwohl die Grundprinzipien geklärt waren, enthielt die Theorie eine Fülle von noch unbestätigten Annahmen, und es war schwierig, auf diesen Grundlagen Berechnungen anzustellen. Voraussagen, die von gleich bedeutenden Physikern in der Zeit von 1940 gemacht wurden, stimmten vielfach nicht überein. In allzu vielen Richtungen war der Gegenstand mehr eine Kunst als eine Wissenschaft.

ZUSAMMENFASSUNG

1.60. Blicken wir zurück auf das Jahr 1940, so sehen wir, daß alle Voraussetzungen gegeben waren, um das Problem, eine Atombombe zu erzeugen und die Atomenergie zu beherrschen, ernsthaft in Angriff zu nehmen. Es war bewiesen, daß Masse und Energie Äquivalente sind. Es war auch bewiesen, daß die Neutronen, die eine Uranspaltung herbeiführen, selbst wieder Neu-

tronen in diesem Prozeß erzeugen, und daß infolgedessen eine sich selbst vermehrende Kettenreaktion von explosiver Gewalt möglich sei. Freilich, kein Mensch wußte, ob man die dafür nötigen Bedingungen verwirklichen könne, aber viele Forscher hatten klare Ideen über das vorliegende Problem und darüber, in welcher Richtung man vorgehen müsse. Das nächste Kapitel dieses Berichtes gibt eine Darstellung des Problems und dient als Führer zu den Entdeckungen der letzten fünf Jahre.

II. KAPITEL. DARLEGUNG DES PROBLEMS

EINFÜHRUNG

2.1. Angefangen von der Entdeckung der großen Energiebeträge, die bei Kernreaktionen frei werden können, bis zu der Zeit der Entdeckung der Uranspaltung wurde die Idee der Atomenergie und sogar der Atombombe immer und immer wieder in wissenschaftlichen Kreisen diskutiert. Die Entdeckung der Uranspaltung machte diese Gespräche viel weniger spekulativ, aber trotzdem schien die Realisierung der Atomenergie in weiter Zukunft zu liegen, und manche Gelehrte hatten das instinktive Gefühl, daß diese Realisierung tatsächlich niemals gelingen werde. Während der Jahre 1939 und 1940 lenkten manche öffentliche Darlegungen, darunter solche von verantwortlichen Gelehrten, die Aufmerksamkeit auf die enorme Energie, die im Uran für Explosionen oder für regulierte Energiequellen bereitliege, so daß U-235 ein gebräuchliches Schlagwort war, um große kommende Dinge anzukünden. Auf die Möglichkeit, daß Uranspaltung militärisch wichtig werden könne, wurde die Regierung aufmerksam gemacht (vergleiche Kapitel III), und in einer Konferenz mit Vertretern des Marineamts im März 1939 sprach *Fermi* die Vermutung aus, daß es möglich sei, mit langsamen Neutronen eine beherrschbare Reaktion oder mit schnellen Neutronen eine Reaktion explosiven Charakters zu realisieren. Er legte dar, daß immerhin die damals zur Verfügung stehenden Daten für eine sichere Voraussage noch ungenügend seien.

2.2. Im Sommer 1940 wurde es möglich, das Problem ziemlich klar zu formulieren, obwohl man noch weit davon entfernt war, die vielen offenen Fragen zu beantworten oder auch nur zu entscheiden, ob eine Kettenreaktion überhaupt möglich sei. In dem folgenden Kapitel wollen wir eine Darlegung des Problems in seiner Gesamtheit geben. Um dabei verständlich zu sein, benutzen wir auch einige Kenntnisse, die man damals noch nicht hatte, sondern erst später gewann.

DAS KETTENREAKTIONSPROBLEM

2.3. Das Prinzip der Wirksamkeit einer Atombombe oder einer Kraftanlage mit Uraniumspaltung ist einfach genug. Wenn ein Neutron Kernspaltung herbeiführt und diese mehr als ein neues Neutron erzeugt, dann kann die Zahl der Spaltungen riesig anwachsen und damit die Befreiung enormer Beträge von Energie erfolgen. Das ist eine Frage der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Die in einem Spaltprozeß erzeugten Neutronen können vollständig verloren gehen, sie können aber auch vom Uran eingefangen werden in einem Prozeß ohne Spaltung oder sie können durch eine Verunreinigung eingefangen werden. Die Frage, ob eine Kernreaktion zustande kommt oder nicht, hängt ab von dem Überwiegen des einen oder anderen der vier möglichen Prozesse:

(1) Verlust durch Entweichen der Neutronen;

(2) Einfang durch Uranium in einem Prozeß ohne Spaltung;

(3) Einfang durch Verunreinigungen in einem Prozeß ohne Spaltung;

(4) Einfang mit Kernspaltung.

Wenn der Neutronenverlust durch die ersten drei Prozesse kleiner ist als der Überschuß, den der vierte Prozeß liefert, dann kommt die Kettenreaktion zustande, sonst nicht. Offenbar kann in einer gegebenen Anordnung jeder von den ersten drei Prozessen einen so hohen Grad von Wahrscheinlichkeit haben, daß die bei der Spaltung erzeugten zusätzlichen Neutronen nicht ausreichen, um eine Reaktion in Gang zu halten. Zum Beispiel: wenn sich ergeben sollte, daß der Prozeß (2) (spaltungsloser Einfang durch Uranium) eine viel höhere Wahrscheinlichkeit hat als Spaltungseinfang (4), dann würde es voraussichtlich nicht möglich sein, eine Kernreaktion herbeizuführen.

2.4. Eine zusätzliche Komplikation besteht darin, daß natürliches Uranium aus drei Isotopen besteht: U-234, U-235 und U-238 mit einer Häufigkeit von annähernd 0,006, 0,7 und 99,3%. Wir haben bereits gesehen, daß die Wahrscheinlichkeiten der Prozesse 2 und 4 für verschiedene Isotope verschieden sind. Auch haben wir gesehen, daß die Wahrscheinlichkeiten für Neutronen verschiedener Energie verschieden sind.

2.5. Nunmehr wollen wir die Grenzen, die durch die drei

ersten Prozesse gegeben sind, in Betracht ziehen und die Mittel, wie man die Wirkung dieser Prozesse auf ein Minimum reduzieren kann.

Verlust durch Entweichen der Neutronen Kritische Grösse

2.6. Der Anteil der Neutronen, die aus einer Uranmenge entweichen, kann durch Veränderung der Größe und Gestaltung (des Urankörpers) auf ein Minimum reduziert werden. Bei einer Kugelgestalt ist jeder Oberflächeneffekt proportional dem Quadrat des Radius und jeder Volumeneffekt proportional dem Kubus des Radius. Nun ist das Entweichen der Neutronen aus einer Uranmenge ein Oberflächeneffekt, der von der Größe der Oberfläche abhängt, während der Spaltungseinfang der Neutronen im Inneren des Uraniummaterials stattfindet und folglich ein Volumeneffekt ist. Daraus geht hervor, daß mit der wachsenden Menge von Uranium die Wahrscheinlichkeit dafür abnimmt, daß der Neutronenverlust über den Spaltungseinfang überwiegt und die Kettenreaktion verhindert. Der Neutronenverlust durch spaltungslosen Einfang ist dagegen ein Volumeneffekt wie die Neutronenerzeugung durch Spaltungseinfänge, so daß die Vergrößerung hier keinen Einfluß auf das Verhältnis von Wirkung und Gegenwirkung ausübt.

2.7. Als kritische Größe einer Anordnung mit Uran kann man diejenige Größe definieren, bei welcher die Erzeugung freier Neutronen durch Spaltung gerade ebenso groß ist wie ihr Verlust durch Entweichen und spaltungslosen Einfang. Mit anderen Worten: wenn die Größe kleiner als die kritische Größe ist, so kann es nach dieser Definition zu keiner sich selbst aufrechterhaltenden Kettenreaktion kommen. Prinzipiell konnte man 1940 diese kritische Größe berechnen, aber praktisch war die Unsicherheit der dabei wichtigen Konstanten so groß, daß die verschiedenen Schätzungen stark divergierten. Es erschien damals nicht unwahrscheinlich, daß die kritische Größe für praktische Zwecke zu hoch sei. Sogar gegenwärtig ändern sich die Schätzungen für noch nicht experimentell untersuchte Anordnungen gelegentlich von Zeit zu Zeit, wenn neue Unterlagen zugänglich werden.

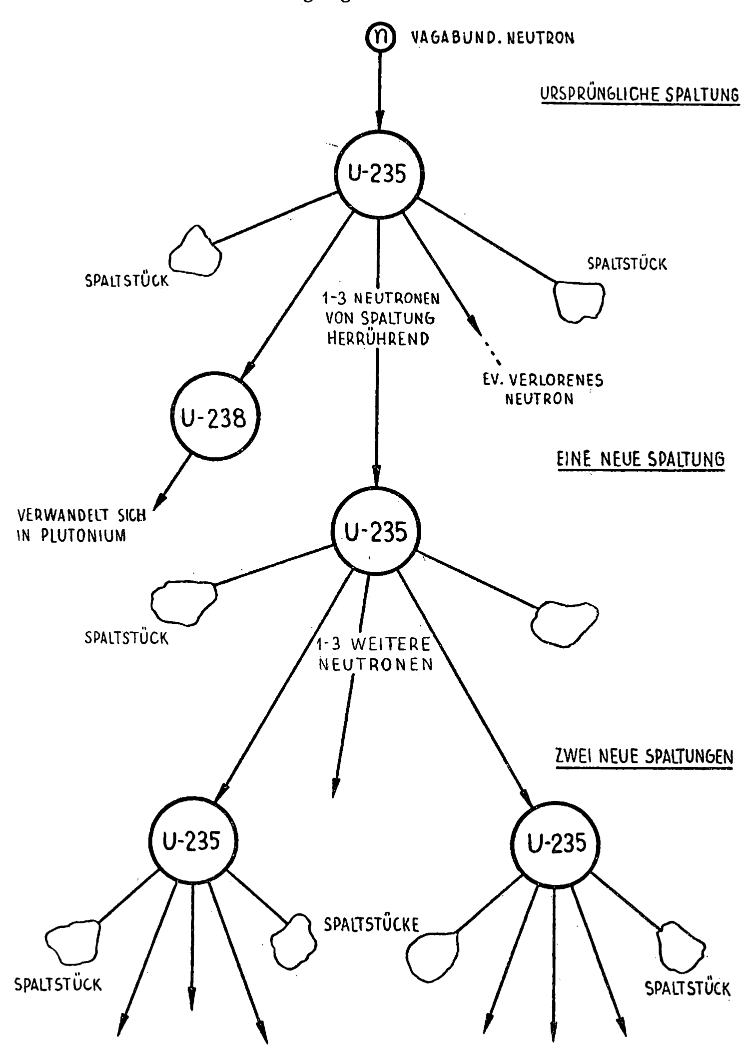
Benutzung eines Moderators (Bremsstoffes) zur Verringerung der spaltungslosen Neutroneneinfänge

2.8. Im ersten Kapitel legten wir dar, daß thermische Neutronen die größte Wahrscheinlichkeit haben, U-235 Atome zu spalten, aber wir fügten hinzu, daß die bei der Spaltung neu entstehenden Neutronen hohe Geschwindigkeiten haben. Es war also eine zu starke Vereinfachung, zu sagen, daß die Kettenreaktion sich dann selbst aufrechterhält, wenn mehr Neutronen durch Spaltung erzeugt als absorbiert werden. Denn die Wahrscheinlichkeiten für Spaltungseinfang und für spaltungslosen Einfang hängen von der Geschwindigkeit der Neutronen ab. Unglücklicherweise liegt die Geschwindigkeit, für die der spaltungslose Einfang höchste Wahrscheinlichkeit besitzt, zwischen der durchschnittlichen Neutronengeschwindigkeit der bei der Spaltung ausgesandten Neutronen und derjenigen Geschwindigkeit, die am häufigsten Spaltungseinfänge ergibt.

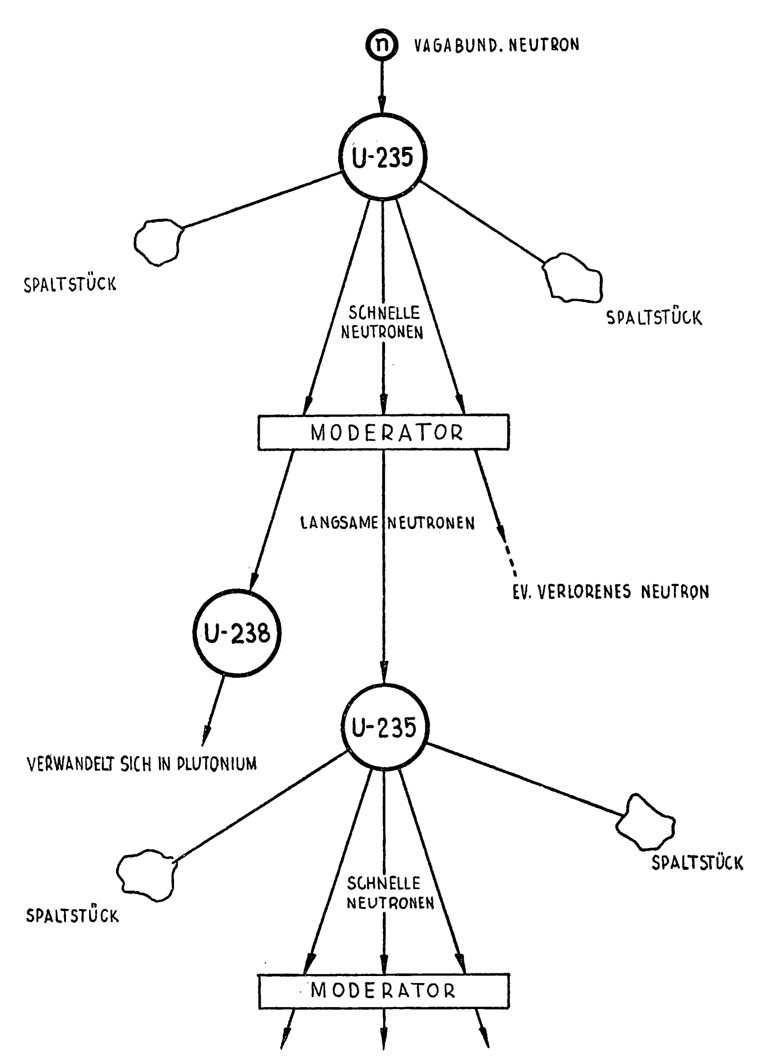
2.9. Schon Jahre vor der Entdeckung der Spaltung war der übliche Weg, Neutronen zu verlangsamen, der, sie durch Materie von geringem Atomgewicht wie etwa wasserstoffhaltiges Material hindurchgehen zu lassen. Der Verlangsamungsprozeß (Moderation)[1] beruht auf elastischem Zusammenstoßen zwischen schnellen Teilchen und praktisch ruhenden Teilchen. Je weniger verschieden die Masse der Neutronen und der getroffenen Partikel ist, desto größer ist der Geschwindigkeitsverlust des stoßenden Neutrons. Infolgedessen sind die leichten Elemente als Moderatoren, d. h. als Bremsstoffe für Neutronen, besonders geeignet.

2.10. Mehrere Physiker hatten den Einfall, durch geeignete Mischung von Uran mit Bremsstoff zu erreichen, daß die schnellen Spaltungsneutronen nach ihrem Ausgang vom Uran und vor ihrem nächsten Zusammenstoß mit Uraniumkernen *unter* die Geschwindigkeit gebremst würden, für die spaltungsloser Einfang hohe Wahrscheinlichkeit besitzt. Offenbar muß ein guter Bremsstoff folgende charakteristischen Eigenschaften haben: er muß von geringem Atomgewicht sein und soll keine oder nur geringe

[1] Im folgenden wird moderator meist kurz mit Bremsstoff, to moderate mit bremsen übersetzt — denn es handelt sich immer darum, Neutronengeschwindigkeit herabzusetzen, d. h. die Neutronen zu bremsen.



Schematische Darstellung einer Kettenreaktion durch Spaltung ohne Berücksichtigung der Neutronengeschwindigkeit. Bei einer explosionsartigen Kettenreaktion nimmt die Zahl der Neutronen unbegrenzt zu. Bei einer kontrollierten Kettenreaktion nimmt die Anzahl der Neutronen zu, bis sie eine bestimmte Grenze erreicht, und bleibt dann konstant.



Schematische Darstellung einer Kettenreaktion durch Spaltung bei Benutzung eines Moderators. Dieser dient dazu, die Neutronengeschwindigkeit so weit herabzusetzen, daß die Spaltungswahrscheinlichkeit vergrößert wird.

Absorptionsfähigkeit für Neutronen haben. Lithium und Bor sind deswegen ausgeschlossen (sie absorbieren Neutronen). Helium ist schwer zu benutzen wegen seiner Edelgaseigenschaften (es geht keine Verbindungen ein). Man hat für den Bremsstoff folglich nur die Auswahl zwischen Wasserstoff, Deuterium, Beryllium und Kohle. Selbst heute noch kann man keine von diesen Substanzen aus der Liste der praktischen Möglichkeiten streichen. *F. Fermi* und *L. Szilard* schlugen Graphit als Bremsstoff für die Kettenreaktion vor.

Gitterförmige Anordnung zur Verringerung der Zahl der spaltungslosen Einfänge

2.11. Das allgemeine Schema, daß Uran mit einem Bremsstoff gemischt verwendet werden sollte, war ganz klar. Soweit wir feststellen können, wurde von *Fermi* und *Szilard* zuerst eine spezielle Methode für die Benutzung eines Bremsstoffes hierzulande vorgeschlagen. Die Idee war, Brocken von Uran von beträchtlicher Größe zu benutzen und sie in eine Matrix von Bremsstoff einzubetten. Es läßt sich zeigen, daß eine solche Gitteranordnung wirkliche Vorteile vor einer gleichmäßigen Mischung haben kann. Als die Konstanten genauer bestimmt werden konnten, wurde es möglich, die Art des wirksamsten Gitters theoretisch vorauszuberechnen.

Verminderung des spaltungslosen Einfangprozesses durch Isotopentrennung

2.12. Im ersten Kapitel wurde festgestellt, daß für Neutronen bestimmter mittlerer Geschwindigkeit (mit Energien von einigen Elektronvolt) U-238 einen großen Einfangwirkungsquerschnitt hat, und zwar für die spaltungslose Erzeugung von U-239. Außerdem besteht eine beträchtliche Wahrscheinlichkeit für unelastische (nicht Einfang erzeugende)[1] Zusammenstöße zwischen

[1] Hier sind solche Zusammenstöße gemeint, bei denen das stoßende Neutron Geschwindigkeit einbüßt, ohne eingefangen zu werden, der Fall, der in 1.57 unter 10. angegeben ist. Im englischen Text steht «i. e. non-capture-producing». Das «id est» kann mißverstanden werden, da Einfang ja auch nichtelastischen Stoß bedeutet. Deswegen wurde i. e. (das ist) in der Übersetzung weggelassen.

schnellen Neutronen und U-238 Kernen. Auf diese Weise wirkt die Anwesenheit von U-238 sowohl im Sinne einer Geschwindigkeitserniedrigung der schnellen Neutronen als auch im Sinne eines erhöhten Einfangs von Neutronen verringerter Geschwindigkeit. Obwohl einige spaltungsfreie Einfänge durch Uran-235 vorkommen, wird hierdurch klar, daß bei Abtrennung von U-235 von U-238 und Entfernung des letzteren die Anzahl der spaltungsfreien Einfänge zugunsten einer Kettenreaktion reduziert werden kann. Tatsächlich kann bei Entfernung von U-238 die Spaltungswahrscheinlichkeit des U-235 durch schnelle Neutronen groß genug sein, um einen Bremsstoff unnötig zu machen. Unglücklicherweise ist U-235 in dem natürlichen Uranium nur im Verhältnis von 1 : 140 enthalten. Die verhältnismäßig kleine Massendifferenz zwischen den beiden Isotopen macht überdies die Trennung schwierig. Im Jahre 1940 war tatsächlich noch keine Isotopentrennung in größerem Maßstab durchgeführt, außer bei Wasserstoff, dessen beide Isotopen eine Massendifferenz im Verhältnis von 1 : 2 haben. Nichtsdestoweniger wurde früh erkannt, daß die Möglichkeit der Abtrennung des U-235 von der größten Wichtigkeit ist, und diese Abtrennung wurde tatsächlich eine von den zwei Hauptrichtungen der planmäßigen Bemühungen der folgenden fünf Jahre.

Erzeugung und Reinigung der Rohstoffe

2.13. Wir haben oben festgestellt, daß der Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang bei verschiedenen Materialien sehr verschieden ist. Bei einigen davon ist er im Vergleich zum maximalen Wirkungsquerschnitt für Spaltung der Uraniumkerne sehr groß. In diesen Fällen können wir eine Kettenreaktion nur dann zu verwirklichen hoffen, wenn wir den Effekt 3 (vergl. 2.3.), d. h. die spaltungslosen Neutroneneinfänge durch die Verunreinigungen, so stark reduzieren, daß er nicht mehr ernstlich stört. Dies aber bedeutet äußerst sorgfältige Reinigung des Uranmetalls und des Bremsstoffes. Berechnungen ergeben, daß die höchste zulässige Konzentration der Verunreinigungen bei einigen Elementen nur einige Millionstel beträgt, sowohl wenn diese Verunreinigungen im Uranium wie wenn sie im Bremsstoff sind. Wenn wir nun bedenken, daß 1940 die Gesamtmenge von

Uraniummetall, die man hierzulande erzeugte, nur einige Gramm betrug, und zwar von zweifelhafter Reinheit, daß ferner die gesamte Berylliummetallproduktion nicht mehr als wenige Pfund ausmachte, daß wir nicht mehr als einige Pfund konzentriertes Deuterium produzierten und schließlich, daß niemals Kohlenstoff (Graphit) in Mengen auch nur einigermaßen mit der Reinheit erzeugt worden war, wie sie für seine Benutzung als Bremsstoff notwendig ist — dann wird es uns klar, daß die Aufgabe, die Materialien zu erzeugen und zu reinigen, eine der wichtigsten war.

Lenkung der Kettenreaktion

2.14. Die bisher erörterten Probleme betreffen überwiegend die Verwirklichung der Kettenreaktion. Verfügen wir über eine solche brauchbare Reaktion, dann müssen wir sie steuern können. Diese Aufgabe hängt davon ab, ob wir nutzbare Energie oder eine Explosion herbeiführen wollen. Im allgemeinen verlangt eine dauernde Produktion von Atomenergie eine Kettenreaktion mit Hilfe von Atomspaltungen durch langsame Neutronen innerhalb einer Mischung oder eines «Gitters» von Uranium und Bremsstoff; dagegen verlangt eine Atombombe eine Kettenreaktion von U-235 oder Pu-239 mit Spaltungsprozessen durch schnelle Neutronen; obgleich in beiden Fällen langsame und schnelle Neutronen mitwirken können. Schon im Jahre 1940 schien es wahrscheinlich, daß durch Benutzung von neutronenabsorbierenden Stoffen eine Lenkung der Kettenreaktion möglich sei. Ferner galt es für wahrscheinlich, aber nicht für sicher, daß eine solche Kettenreaktion sich dadurch selbst begrenze, daß sie hohe Temperaturen erzeuge und dadurch die Wahrscheinlichkeit für spaltungserzeugenden Neutroneneinfang herabsetze[1]. Immerhin bestand die Möglichkeit, daß ein Kenttenreaktionssystem sich der Kontrolle entziehe, und deswegen erschien es notwendig, die diesbezüglichen Experimente in einer unbewohnten Gegend anzustellen.

---

[1] Bei sehr hohen Temperaturen werden die Neutronengeschwindigkeiten so groß, daß der Wirkungsquerschnitt für Spaltungseinfang sinkt. Allgemein ist die Wahrscheinlichkeit des Einfangs (-Wirkungsquerschnitt) für Neutronen der Geschwindigkeit umgekehrt proportional.

Praktische Anwendung der Kettenreaktion

2.15. Bis jetzt haben wir erörtert, wie man eine Kettenreaktion erzeugen und beherrschen könne, aber noch nicht, wie man sie benutzen soll. Die technologische Kluft zwischen der Produktion und Regulierung einer Kettenreaktion und ihrer Benutzung als großer Energiequelle oder in einem Explosivkörper ist vergleichbar dem Abstand zwischen der Entdeckung des Feuers und der Herstellung der Dampflokomotive.

2.16. Obwohl die Erzeugung von Energie niemals der Hauptgegenstand dieses Vorhabens war, hat man ihr doch genügend Aufmerksamkeit geschenkt, um die Hauptschwierigkeit zu erkennen: das Erreichen eines Verfahrens mit hoher Temperatur. Eine wirksame Wärmemaschine muß nicht nur Wärme entwikkeln, sondern muß sie bei hoher Temperatur liefern. Ein Kernreaktionssystem auf eine hohe Temperatur zu bringen und die dabei erzeugte Wärmeenergie nutzbar zu machen, ist tatsächlich viel schwerer als ein Kernreaktionssystem bei geringer Temperatur zu führen.

2.17. Selbstverständlich gibt der Beweis der Möglichkeit einer Kernreaktion an sich noch keine Sicherheit, daß die Kernenergie in einer Bombe wirksam gemacht werden kann. Um eine wirksame Explosion zu bekommen, ist es notwendig, daß die Kernreaktion äußerst rapid verläuft; andernfalls wird nur ein kleiner Betrag der Kernenergie verfügbar, bevor die Bombe auseinanderfliegt und die Reaktion abstoppt. Ferner ist es nötig, daß keine verfrühte Explosion zustandekommt. Dieses ganze Detonationsproblem war und bleibt eines der schwierigsten Probleme bei der Entwicklung einer Atombombe von hoher Wirksamkeit.

Möglichkeit der Verwendung von Plutonium

2.18. Bis jetzt haben unsere Erörterungen in erster Linie sich mit der Benutzung von Uran selber befaßt. Wir haben aber schon die Vermutung erwähnt, daß das Element von der Ordnungszahl 94 und der Massenzahl 239, das man gewöhnlich Plutonium nennt, sehr wirksam sein könnte. Tatsächlich sind wir jetzt der Ansicht, daß es einen Wert hat, der sich mit dem von reinem U-235 vergleichen läßt. Wir haben auch schon die Schwierigkeit, U-235

von dem reichlich zur Verfügung stehenden Isotop 238 abzutrennen, erwähnt. Da es ja zwei Isotope sind, ist ihr chemisches Verhalten natürlich dasselbe. Dagegen ist Plutonium, obwohl es aus U-238 erzeugt wird, ein anderes chemisches Element. Wenn man also ein Verfahren ausarbeiten könnte, um U-238 in Plutonium zu verwandeln, dann könnte sich eine *chemische* Trennung des Plutoniums von Uranium als besser ausführbar erweisen als eine *Isotopen*trennung des U-235 von U-238.

2.19. Nehmen wir einmal an, wir hätten eine regulierbare Kettenreaktion in einer Gitterkonstruktion von natürlichem Uran und einem Bremsstoff, etwa Kohlenstoff in Form von Graphit, aufgebaut. Dann werden, wenn die Kettenreaktion abläuft, durch U-235-Spaltungen Neutronen emittiert und davon wird ein großer Teil in U-238 absorbiert. Diese erzeugen U-239. Jedes Atom U-239, das Beta-Teilchen ausstrahlt, wird zu Neptunium ($_{93}Np^{239}$). Neptunium seinerseits sendet ein weiteres Beta-Teilchen aus, es wird zu Plutonium ($_{94}Pu^{239}$), das einen Alpha-Strahl aussendet und auf U-235 abbaut, jedoch so langsam, daß man es als praktisch stabil ansehen kann (siehe Figur auf S. 24). Wenn nach genügender Dauer eines solchen Prozesses das Metallgemisch entfernt wird, kann es möglich sein, das Plutonium durch chemische Methoden zu extrahieren und zu reinigen, um es in einem folgenden explosiven Kettenreaktionsprozeß zu benutzen.

Kombinationseffekte und angereicherte Einheiten[1]

2.20. Es wurden drei Wege bereits erwähnt, die zur Steigerung der Wahrscheinlichkeit einer Kettenreaktion führen: Benutzung eines Bremsstoffes, Erreichung hoher Materialreinheit, Benutzung spezieller Stoffe, entweder U-235 oder Pu. Diese drei Prozeduren schließen sich gegenseitig nicht aus, und verschiedene Schemata sind vorgeschlagen worden, um kleine Beträge von abgetrennten U-235 oder Pu-239 in einem «Gitter», das überwiegend gewöhnliches Uranium oder Uraniumoxyd mit Bremsstoff oder zwei verschiedenen Bremsstoffen enthält, zu benutzen. Die so vorgeschlagenen Arrangements werden gewöhnlich «angereicherte Einheiten»[2] genannt.

---

[1] Über das Wort «Einheiten» vergleiche die Fußnote zu 4.8.
[2] «enriched piles».

BENUTZUNG VON THORIUM ODER PROTOACTINIUM ODER VON ANDEREN STOFFEN

2.21. Alle vorangegangenen Erörterungen bezogen sich auf die direkte oder indirekte Anwendung von Uran. Aber man wußte, daß sowohl Thorium wie Protoactinium gleichfalls spaltbar sind bei Bombardierung mit Neutronen hoher Geschwindigkeit. Der große Vorteil des Urans, wenigstens für den Anfang, bestand in seiner Empfänglichkeit für langsame Neutronen. Deswegen schenkte man den andern beiden Substanzen nicht viel Beachtung. Protoactinium kann man ausscheiden, weil es in der Natur zu selten vorkommt. Thorium gibt es relativ reichlich, aber es hat keine offenkundigen Vorteile gegenüber dem Uran.

2.22. Man darf nicht vergessen, daß theoretisch manche Kernreaktionen dazu verwendet werden können, Energie zu liefern. Aber gegenwärtig sehen wir keinen Weg, um andere Reaktionen in Gang zu setzen oder zu leiten, als die auf Grund von Spaltungen; aber auch solche Synthesen, wie wir sie oben als Quelle der Sonnenenergie erwähnt haben, mögen eventuell einmal im Laboratorium dazu benutzt werden.

MATERIALBEDARF

2.23. Im Sommer 1940 konnte man nur Vermutungen über die benötigten Materialmengen anstellen, um

(1) eine Kettenreaktion mit einem Bremsstoff,

(2) eine Kettenreaktionsbombe mit reinem oder mindestens angereichertem U-235 oder Plutonium zu erzeugen.

Eine Ziffer von 1 bis 100 kg U-235 wurde damals gewöhnlich für die kritische Größe einer Bombe angegeben. Zu seiner Separation hätte man mindestens das 140fache von natürlichem Uran aufarbeiten müssen. Für eine Kettenreaktion mit langsamen Neutronen, Moderator und nichtabgetrenntem Uran war es ziemlich sicher, daß Tonnen von Metall und Bremsstoff nötig waren.

VERFÜGBARKEIT DER MATERIALIEN

2.24. Schätzungen über die Zusammensetzung der Erdkruste zeigen, daß Uran und Thorium in beträchtlichen Mengen vor-

handen sind (Uran ungefähr vier zu einer Million Teile und Thorium zwölf zu einer Million Teile in der Erdkruste). Bekannt waren Uranerzvorkommen in Colorado, in der Region des großen Bärensees in Nordkanada, in Joachimsthal in der Tschechoslowakei und in Belgisch-Kongo. Manche andere Vorkommen von Uranerz waren bekannt, aber in vielen Fällen in ihrer Ausdehnung nicht erforscht. Uran wird immer mit Radium zusammen gefunden, jedoch in wesentlich größeren Quantitäten als dieses. Beide werden häufig mit Vanadiumerzen zusammen gefunden. In der Keramikindustrie sind kleine Mengen von Uranoxyd seit einer Reihe von Jahren benutzt worden.

2.25. Thorium ist auch ziemlich weit verbreitet, und zwar als Thoriumoxyd in recht hoher Konzentration im Monazitsand. Solche Sande werden hierzulande in einem gewissen Ausmaß gefunden, hauptsächlich aber in Brasilien und Britisch-Indien.

2.26. Neuere rohe Schätzungen, die wahrscheinlich optimistisch sind, geben an, daß die nutzbare Kernenergie der bekannten Vorkommen von Uran ausreichen würde, um den gesamten Kraftbedarf dieses Landes für 200 Jahre zu decken (wobei die Ausnutzung von U-238 und U-235 gemeint ist).

2.27. Wie schon erwähnt, wurde bis 1940 wenig oder kein Uranmetall erzeugt, und das Wissen über Uran war so gering, daß selbst der Schmelzpunkt unbekannt war (zum Beispiel gibt das *Handbuch der Physik und Chemie*[1] für 1943/44 lediglich an, daß der Schmelzpunkt unter 1850 Grad Celsius liegt, während wir jetzt wissen, daß er in der Nachbarschaft von 1150 Grad liegt). Offenbar gab es, soweit Uran in Betracht kam, keine unübersteigbare Schwierigkeit hinsichtlich des Rohmaterials oder der Erzeugung des Metalls; aber die Frage war sehr schwer zu lösen, wie lange es dauern werde und was es kosten werde, die nötigen Mengen reinen Metalls zu erzeugen.

2.28. Von den oben erwähnten Stoffen, die sich als Moderatoren eignen, hat Deuterium die offensichtlichsten Vorteile. Im gewöhnlichen Wasserstoff ist es in einem Verhältnis von 1 : 5000 enthalten. 1940 waren verschiedene Methoden, es vom Wasserstoff zu trennen, entwickelt, und einige Liter für experimentelle

---

[1] Handbook of Physics and Chemistry.

Zwecke waren hierzulande hergestellt worden. Die einzige Großproduktionsstätte befand sich in einer norwegischen Anlage, von der mehrere hundert Liter schweres Wasser (D_2O, Deuteriumoxyd) geliefert worden waren. Wie im Falle des Urans war dies eine Frage der Kosten und der Zeit.

2.29. Beryllium wird in der Form von Berylliumsilikat vielfach gefunden, doch immer in kleinen Erzvorkommen. Seine Benutzung als Legierungsbestandteil kam in den letzten Jahren allgemein auf; für diesen Zweck ist es jedoch nicht notwendig, das Beryllium in metallischer Form herzustellen. 1940 wurden lediglich 700 Pfund des Metalls hierzulande erzeugt.

2.30. Was den Kohlenstoff anlangt, lag die Situation offensichtlich ganz anders. Viele hundert Tonnen Graphit wurden jährlich in diesem Land erzeugt. Das war einer der Gründe, warum Graphit als Bremsstoff (Moderator) sehr geeignet schien. Hier lag die Schwierigkeit darin, genügend Quantitäten Graphit von hoher Reinheit zu erzeugen, insbesondere auch mit Rücksich auf den wachsenden Bedarf der Kriegsindustrie.

ABSCHÄTZUNG VON ZEIT UND KOSTEN

2.31. Der Bedarf an Zeit und Kosten hing nicht nur von unbekannten wissenschaftlichen und technischen Faktoren, sondern auch von politischen Entscheidungen ab. Offensichtlich konnte es Jahre an Zeit und Millionen von Dollars kosten, um das letzte Ziel zu erreichen. Alles, was man damals versuchte, war, Schätzungen darüber anzustellen, wie lange es dauern und wie viel es kosten werde, die wissenschaftlichen und technischen Chancen zu klären. Es sah so aus, als wäre es kein allzu schwieriges Unternehmen, die Entwicklung einer Kettenreaktion mit thermischen Neutronen in einem Graphituraniumgitter bis zu dem Punkt durchzuführen, wo man sagen könnte, ob eine Kettenreaktion tatsächlich zustande komme. Man schätzte damals, ein Jahr und ungefähr 100 000 Dollars würden zu einer Antwort führen. Diese Schätzung galt einer Kettenreaktion von ganz kleiner Energieleistung ohne Kühlsystem und ohne Einrichtungen, die gewonnene Energie zu benutzen.

GESUNDHEITSRISIKEN

2.32. Man wußte längst, daß radioaktive Stoffe gefährlich sind. Sie senden sehr durchdringende Strahlen (γ-Strahlen) aus, die den Röntgenstrahlen in ihrem physiologischen Effekt sehr ähnlich sind. Sie senden aber auch β- und α-Strahlen aus, die, wenngleich weniger durchdringend, doch gefährlich sein können. Die Radiummengen, die man in Spitälern und bei gewöhnlichen physikalischen Messungen zu benutzen pflegt, betragen nur einige Milligramm. Die Mengen radioaktiven Materials, die bei der Uranspaltung in einem relativ kleinen Kettenreaktionssystem entstehen, können Hunderten oder Tausenden von Grammen Radium äquivalent sein. Außerdem sendet ein Kettenreaktionssystem intensive Neutronenstrahlung, die in ihrer Gesundheitsschädigung γ-Strahlen vergleichbar ist. Ganz abgesehen von den radioaktiven Eigenschaften ist Uran aber auch chemisch giftig. Auf diese Weise ist nahezu jede Beschäftigung auf diesem Gebiet gefährlich, besonders die Beschäftigung mit Kettenreaktionen und den daraus hervorgehenden radioaktiven Stoffen.

LÖSUNGSWEGE[1]

2.33. Es gab zwei Wege, das Problem anzupacken. Der eine bestand darin, sorgfältige physikalische Meßreihen über die Absorptionswirkungsquerschnitte der verschiedenen Materialien und für verschiedene durch Neutronen eingeleitete Prozesse bei verschiedenen Neutronenenergien durchzuführen. Sind einmal solche Daten zur Verfügung, so lassen sich mit einiger Genauigkeit Rechnungen darüber anstellen, was in Richtung einer Kettenreaktion geschehen kann. Die andere Methode war, zu versuchen, rein empirisch durch Mischung von Uranium oder Uraniumverbindungen in verschiedener Art mit verschiedenen Moderatoren zuzusehen, was dabei herauskäme. Auch für die Isotopentrennung war es möglich, so extrem verschiedene Wege zu gehen. Tatsächlich wählte man einen Zwischenweg, ein Kompromiß, und zwar in beiden Fällen.

---

[1] Die englische Überschrift: «Method of approach to the problem» heißt wörtlich: Methode, sich dem Problem zu nähern.

ENERGIE-ERZEUGUNG ODER BOMBE

2.34. Die erwarteten militärischen Vorteile der Uranbombe waren weit mehr in die Augen springend als die einer Uranenergieanlage. Es war denkbar, daß einige Uranbomben für den Kriegsausgang entscheidend sein könnten, und zwar zugunsten der Partei, die sie zuerst anwende. Solche Gedanken bewegten viele Köpfe, die auf diesem Gebiet arbeiteten; aber zuerst galt es, die Voraussetzung, eine Kettenreaktion mit langsamen Neutronen, zustande zu bringen, als einleitenden Schritt zur Bereicherung unserer Kenntnisse, und dies war das erste Ziel der hierfür interessierten Gruppe. Das war auch ein entscheidender Schritt, um die militärischen Autoritäten und die skeptischeren Gelehrten davon zu überzeugen, daß das ganze Unterfangen kein Phantasiegebilde sei. Zum Teil aus diesen Gründen, zum Teil auch wegen der extremen damals auferlegten Geheimhaltung erscheint die Idee der Atombombe in den Berichten zwischen Sommer 1940 und Herbst 1941 nicht oft.

MILITÄRISCHE VERWENDBARKEIT

2.35. Wenn alle Atome eines Kilogramms U-235 aufspalten, so ist die befreite Energie äquivalent der Explosion von zirka 20 000 Tonnen TNT[1]. Wenn die kritische Größe einer Bombe sich als praktisch ausführbar erweist, sagen wir im Intervall von eins bis einhundert Kilogramm, und all die anderen Probleme gelöst werden können, so bleiben noch zwei Fragen: 1. wie viele von den spaltbaren Kernen können zur Spaltung gebracht werden, bevor die Kettenreaktion aufhört? 2. Wie wirkt die Entfesselung einer derartig konzentrierten Energie? Denn selbst wenn nur ein Prozent der theoretisch zur Verfügung stehenden Energie befreit würde, mußte noch immer eine Explosion entstehen von ganz anderer Größenordnung, als sie von irgendwelchen bisher bekannten Arten von Bomben erzeugt werden konnte. So war der Wert einer solchen Bombe für die militärischen Experten eine Frage, die sorgfältigste Überlegung erforderte.

---

[1] TNT internationale Abkürzung für Trinitrotoluol.

ZUSAMMENFASSUNG

2.36. Es wurde festgestellt, 1. daß Uraniumspaltung mit der Befreiung großer Energiebeträge verbunden ist; 2. daß bei diesem Prozeß zusätzliche Neutronen frei werden, die eine Kettenreaktion in Gang setzen können. Daß eine solche Reaktion zustandekommen könne, und daß sie eine höchst wichtige militärische Anwendung als Bombe haben könnte, dem stand kein grundsätzlicher Einwand entgegen. Die Idee war gleichwohl revolutionär und infolgedessen bedenklich. Es stand fest, daß viele technische Verfahren von großer Schwierigkeit ausgearbeitet werden müßten, bevor eine solche Bombe hergestellt werden könnte. Wahrscheinlich waren die einzigen geeigneten Materialien für diese Bombe entweder U-235, das man von dem 140mal häufigeren Isotop U-238 trennen müßte, oder Pu-239, ein Isotop des bisher unbekannten Elementes Plutonium, das man erst durch einen beherrschten und bisher unbekannten Kettenreaktionsprozeß erzeugen müßte. Um eine regulierbare Kettenreaktion herzustellen, war offenbar Uraniummetall und schweres Wasser oder Beryllium oder Kohlenstoff in großer Menge und großer Reinheit zu erzeugen. War aber einmal das Bombenmaterial erzeugt, dann mußte man noch ein Verfahren entwickeln, um es sicher und wirksam zu benutzen. Bei manchen dieser Prozesse mußten Gesundheitsrisiken einer neuen Art mitberücksichtigt werden.

PROBLEME DER WEITEREN PLANUNG

2.37. Im Sommer 1940 wurde das «National Defense Research Committee» (NDRC) gebildet und forderte viele Gelehrte zur Mitarbeit an verschiedenen dringenden militärischen Aufgaben an. Das wissenschaftliche Personal war begrenzt, obgleich man dies damals noch nicht ganz realisierte. Infolgedessen war es wirklich schwierig, zu entscheiden, in welchem Tempo man die Angelegenheit der Atombombe vorwärts treiben sollte. Die Entscheidung darüber wurde in häufigen Abständen während der folgenden vier Jahre revidiert. In den Kapiteln III und V wird berichtet, wie diese Entscheidungen über das weitere Vorgehen getroffen wurden.

III. KAPITEL. GESCHICHTE DER ORGANISATION[1] *BIS ZUM DEZEMBER 1941*

Das Interesse für militärische Möglichkeiten

3.1. Wie schon in Kapitel I berichtet, wurde im Januar 1939 die Spaltungshypothese und ihre experimentelle Bestätigung der Öffentlichkeit mitgeteilt. Daraus ergab sich ein unmittelbares Interesse an der militärischen Nutzung der großen bei der Spaltung freiwerdenden Energiebeträge. Damals waren die in Amerika geborenen Physiker so wenig vertraut mit der Idee, ihre Wissenschaft zu militärischen Zwecken zu benutzen, daß sie kaum erkennen konnten, was zu geschehen habe. So kam es, daß die frühen Bemühungen um publikatorische Beschränkung und um Staatshilfe in beträchtlichem Umfang von einer kleinen Gruppe von Physikern ausging, die im Ausland geboren waren, in deren Mittelpunkt *L. Szilard* stand und zu denen *E. Wigner, E. Teller, V. F. Weißkopf* und *E. Fermi* gehörten.

Publikationsbeschränkungen

3.2. Im Frühling 1939 gewann die erwähnte Gruppe die Mitwirkung von *Niels Bohr* für das Bemühen, künftig die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse durch eine freiwillige Vereinbarung zu sistieren. Leitende amerikanische und britische Physiker stimmten dem zu; *F. Joliot,* Frankreichs hervorragender Kernphysiker, lehnte ab, offenbar weil ein Brief in der *Physical Review* veröffentlicht wurde, der eingesandt worden war, bevor alle Amerikaner ihr Einverständnis erklärt hatten. Infolgedessen erschienen die Publikationen noch während eines weiteren Jahres, und nur einige wenige wurden durch ihre Verfasser freiwillig zurückgehalten.

---

[1] Der englische Titel heißt «Administrative History», also etwa Verwaltungsgeschichte. Aber der Inhalt zeigt, daß «Organisation» besser paßt als das Wort «Verwaltung».

3.3. Im April 1940 fand eine Zusammenkunft der physikalischen Sektion des *National Research Council* statt; dabei schlug *G. Breit* die Bildung eines Zensur-Komitees vor zur Kontrolle der Veröffentlichung in allen amerikanischen Zeitschriften. Obwohl der Grund für diesen Vorschlag in erster Linie in dem Wunsch bestand, die Veröffentlichungen über Uraniumspaltung zu kontrollieren, hatte das schließlich im Sommeranfang aufgestellte *Reference Committee* (im Rahmen des *National Research Council*) einen allgemeinen Charakter und war zu dem Zweck gebildet, Veröffentlichungen auf allen Gebieten von möglicherweise militärischem Interesse zu überwachen. Der Vorsitzende des Komitees war *L. P. Eisenhart*; andere Mitglieder waren: *G. Breit, W. M. Clark, H. Fletcher, E. B. Fred, G. B. Pegram, H. C. Urey, L. H. Weed* und *E. G. Wever*. Verschiedene Unterkomitees wurden ernannt, von denen das erste sich mit Uranspaltung zu befassen hatte, *G. Breit* war dessen Vorsitzender, die anderen Mitglieder waren J. W. Beams, L. J. Briggs, G. B. Pegram, H. C. Urey und E. Wigner. Die dabei im allgemeinen verfolgte Art des Vorgehens bestand darin, daß die Herausgeber der verschiedenen Zeitschriften Abschriften der Aufsätze auf diesem Gebiet in allen Fällen einsenden müßten, in denen die Zulässigkeit der Information zweifelhaft sei. Die Zusendung erfolgte entweder direkt an *Breit* oder indirekt an ihn durch *Eisenhart*. Breit ließ im allgemeinen die Arbeiten bei allen Mitgliedern des Subkomitees zirkulieren zwecks Prüfung, ob sie veröffentlicht werden sollten oder nicht, und informierte die Herausgeber über das Ergebnis. Dieses Abkommen war recht erfolgreich zur Verhütung von Publikationen und existierte in modifizierter Form nominell noch im Juni 1945. In Wirklichkeit reduzierte die Beanspruchung der meisten Physiker des Landes durch die eine oder andere Art von Kriegsdienst schon bald die Zahl der Publikationen, die dem Komitee unterbreitet wurden, fast auf null. Doch ist es interessant, daß dieses ganze Abkommen völlig freiwillig war; man kann den Gelehrten dieses Landes zu der vollkommenen Zusammenarbeit Glück wünschen, und man muß hoffen, daß es nach dem Kriege möglich sein wird, die Arbeiten wenigstens teilweise zu veröffentlichen, so daß ihre Autoren auch die verdiente berufliche Anerkennung für ihre Beiträge empfangen werden.

Aufnahme der ersten Beziehungen zu der Regierung
Das erste Komitee

3.4. Hinsichtlich der positiven Seite — nämlich der Unterstützung der Kernphysikforschung durch die Regierung — ist die Geschichte wesentlich komplizierter. Den ersten Kontakt mit der Regierung nahm *Pegram* von der Columbia-Universität im März 1939 auf. Er telephonierte dem Marineamt (*Navy Departement*) und arrangierte eine Konferenz zwischen Vertretern dieses Amtes und *Fermi.* Das einzige Resultat dieser Konferenz war, daß die Flotte ihr Interesse ausdrückte und auf dem laufenden gehalten werden wollte. Der nächste Versuch, die Regierung zu interessieren, wurde von *Szilard* und *Wigner* angeregt. Diese konferierten im Juli 1939 mit *Einstein,* und etwas später besprachen *Einstein, Wigner* und *Szilard* das Problem mit *Alexander Sachs* aus New York. Im Herbst unterbreitete *Sachs,* unterstützt durch einen Brief von *Einstein,* dem Präsidenten *Roosevelt,* daß es wünschenswert sei, auf diesem Gebiet die Tätigkeit zu ermutigen. Der Präsident ernannte ein Komitee, das als *Advisory Committee on Uranium*[1] bekannt ist und sich aus *Briggs* (dem Direktor des *Bureau of Standard*) als Vorsitzendem, Oberst *K. F. Adamson* aus dem *Army Ordnance Department* und dem Commander *G. C. Hoover* aus dem *Navy Bureau of Ordnance* zusammensetzte, und beauftragte dieses Komitee, sich mit dem Problem zu befassen. Das war das einzige Uraniumkomitee von offiziellem Charakter bis zu der Zeit, da man im Juni 1940 das *National Defense Research Committee* (NDRC) organisierte. Das Komitee tagte ganz zwanglos und zog zu seinen Tagungen verschiedene Vertreter der Wissenschaft zu.

3.5. Die erste Tagung des Uraniumkomitees fand am 21. Oktober 1939 statt und war außer von den Komiteemitgliedern noch von *F. L. Mohler, Alexander Sachs, L. Szilard, E. Wigner, E. Teller* und *R. B. Roberts* besucht. Ihr Ergebnis war ein Bericht vom 1. November 1939, der durch *Briggs, Adamson* und *Hoover* dem Präsidenten *Roosevelt* überreicht wurde. Der Bericht enthält acht Empfehlungen, die im Detail anzugeben nicht notwendig ist. Immerhin ist es interessant, daß er sowohl die

---

[1] Beratungskomitee für Uraniumfragen.

Atomenergiegewinnung als auch die Atombombe als Möglichkeiten einzeln erwähnt. Er empfiehlt speziell die Besorgung von vier Tonnen Graphit und fünfzig Tonnen Uranoxyd für Messungen über den Absorptionswirkungsquerschnitt von Kohlenstoff. Andere Vorschläge waren entweder allgemeiner Natur oder wurden nicht ausgeführt. Offenbar war ein von *Szilard* vorbereitetes Memorandum mehr oder weniger die Grundlage für die Diskussion auf diesem Meeting.

3.6. Über die ersten Fonds, die von der Armee und der Flotte in Höhe von 6 000 Dollar zum Kauf von Material gemäß den Vorschlägen vom 1. November zur Verfügung gestellt wurden, ist in einem Memorandum von *Briggs* an General *E. M. Watson* (einem Adjutanten des Präsidenten *Roosevelt*) am 20. Februar 1940 berichtet. Die nächste Zusammenkunft des *Advisory Committee on Uranium* fand am 28. April 1940 statt und war von *Sachs, Wigner, Pegram, Fermi, Szilard, Briggs,* Admiral *H. G. Bowen,* Oberst *Adamson* und Commander *Hoover* besucht. Zur Zeit dieser Zusammenkunft waren zwei neue wichtige Faktoren ins Blickfeld gekommen. Erstens hatte man gefunden, daß die Uranspaltung durch Neutronen von «thermischen» Geschwindigkeiten nur bei dem Uranisotop 235 vorkam. Zweitens war berichtet worden, daß eine große Abteilung des Kaiser-Wilhelm-Instituts in Berlin einen Spezialauftrag für Uranforschung erhalten hatte. Obwohl es den Anschein hat, daß der allgemeine Charakter der Diskussion auf diesem Zusammentreffen in einer Betonung der Notwendigkeit verstärkter Bemühungen bestand, wurden keine endgültigen Empfehlungen beschlossen. Man stellte fest, daß entscheidende Messungen über Kohlenstoff an der Columbia-Universität schon im Gange seien und bald zu Resultaten führen würden, und daß man diese Resultate abwarten müsse, um dann feste Vorschläge zu machen.

3.7. Während der nächsten Wochen drängten mehrere sich mit diesen Dingen befassende Leute, insbesondere *Sachs,* auf die Wichtigkeit größerer Unterstützung und besserer Organisation. Ihr Wirken wurde verstärkt durch die Resultate der Columbia-Universität (von denen zum Beispiel in einem Brief von *Sachs* an den General *Watson* vom 15. Mai 1940 berichtet wurde), aus denen hervorging, daß die Absorption im Kohlenstoff beträcht-

lich geringer war als man früher geglaubt hatte, und daß infolgedessen die Wahrscheinlichkeit, im Kohlenstoff einen befriedigenden Bremsstoff (Moderator) zu besitzen, beachtlich war. *Sachs* zeigte sich auch aktiv in der Frage der Erzbeschaffung. Am 1. Juni 1940 kamen *Sachs, Briggs* und *Urey* mit General *Bowen* zusammen, um eine Verbindung mit Vertretern der Union Minière von Belgisch-Kongo herzustellen. Eine solche Annäherung wurde bald darauf durch *Sachs* verwirklicht.

3.8. Der allgemeine Stand des Problems wurde in einer speziellen Beratungsgruppe diskutiert, die *Briggs* im *National Bureau of Standards* am 15. Juni 1940 zusammengerufen hatte. Der Sitzung wohnten bei: *Briggs, Urey, M. A. Tuve, Wigner, Breit, Fermi, Szilard* und *Pegram*. «Nach erschöpfender Diskussion bestand die Empfehlung der Gruppe an das Uraniumkomitee darin, daß Geldmittel beschafft werden sollten, um das Uranium-Kohlenstoff-Experiment in zwei Richtungen zu fördern:

A) Weitere Messungen der Kernkonstanten, die mit dem vorgeschlagenen Reaktionstypus zusammenhängen;
B) Versuche mit Uranium- und Kohlenstoffmengen von etwa $^{1}/_{5}$ bis $^{1}/_{4}$ derjenigen Menge, die man schätzungsweise als Minimum für eine selbstlaufende Kettenreaktion betrachtete.

Man schätzte, daß ungeähr 40 000 Dollar für die weiteren Messungen der Fundamentalkonstanten nötig seien und annähernd 100 000 Dollar für metallisches Uranium und reinen Graphit für die Zwischenexperimente.» (Zitat aus dem Memorandum, das *Pegram* am 14. August 1940 an *Briggs* einreichte.)

Das unter dem NDRC[1] rekonstruierte Komitee

3.9. Bevor eine der Entschließungen dieser Zusammenkunft verwirklicht werden konnte, wurde im Juni 1940 die Organisation des NDRC mitgeteilt und Präsident *Roosevelt* gab Instruktionen, wonach das Uraniumkomitee sich als Unterkomitee des NDRC neu konstituieren und dessen Präsidenten Vannevar Bush Bericht erstatten sollte. Das neu gebildete Uraniumkomitee

[1] National Defense Research Committee.

bestand aus folgenden Mitgliedern: *Briggs,* Vorsitzender; *Pegram, Urey, Beams, Tuve, R. Gunn* und *Breit.* Mit Vollmacht von *Briggs* zog *Breit Wigner* und *Teller* häufig zu, obwohl sie nicht Komiteemitglieder waren. Schon damals bis zum Sommer 1941 wirkte das Komitee mit annähernd dem gleichen Mitgliederbestand. Seine Empfehlungen wurden von *Briggs* dem NDRC übermittelt, und entsprechende Kontrakte wurden zwischen dem NDRC und verschiedenen Forschungsanstalten abgeschlossen. Die Geldmittel wurden jedoch zunächst von Armee und Marine und nicht von regulären NDRC-Zuteilungen gestellt.

Unterstützung der Forschung

3.10. Der erste Kontrakt, der nach erfolgter Reorganisation geschlossen wurde, war ein solcher mit der Columbia-Universität und betraf Forschungen in den beiden Richtungen, wie sie oben als Beschluß der Tagung vom 15. Juni angegeben wurden. Das Projekt wurde vom NDRC gebilligt, und der erste NDRC-Kontrakt (NDCrc-32), welcher am 8. November 1940 unterzeichnet wurde und für die Zeit vom 1. November 1940 bis zum 1. November 1941 gelten sollte, lautete über den Betrag von 40 000 Dollar.

3.11. Bevor dieser Kontrakt zustande kam, waren lediglich ganz kleine Ausgaben gemacht worden, zum Beispiel wurden etwa 3 200 Dollar für Graphit und Cadmium aufgewandt, die den 6 000 Dollar entnommen wurden, welche Armee und Flotte im Februar 1940 bereitgestellt hatten.

3.12. Wir wollen nicht versuchen, eine detaillierte Übersicht über die anderen Kontrakte, die vor Dezember 1941 geschlossen wurden, zu geben. Ihre Anzahl und ihr Gesamtbetrag wuchsen allmählich. *Urey* begann seine Arbeit über die Isotopentrennung nach der Zentrifugalmethode auf Grund eines Kontraktes mit der Flotte vom Herbst 1940. Andere Kontrakte wurden mit der Columbia-Universität, der Princeton-Universität, der Standard Oil Forschungsgesellschaft (Development Company), der Cornell-Universität, der Carnegie-Stiftung in Washington, der Universität Minnesota, dem College des Staates Iowa, der Johns Hopkins-Universität, dem National Bureau of Standards, der Uni-

versität Virginia, der Universität Chicago und der Universität von Californien im Laufe des Winters und des Frühlings 1940/41 abgeschlossen, so daß bis zum November 1941 sechzehn genehmigte Projekte vorlagen, deren Kosten insgesamt 300 000 Dollar betrugen.

3.13. Die Höhe der Ausgaben ermöglicht wenigstens eine Übersicht über die Tätigkeit. Darum ist es interessant, diese Zahl mit Ziffern zu vergleichen, die für andere Zwecke der Kriegsforschung ausgegeben wurden. Im November 1941 betrug das gesamte Budget, das von dem NDRC für das Strahlenlaboratorium am Massachusetts Institute of Technology bewilligt worden war, mehrere Millionen Dollar. Selbst für ein relativ kleines Projekt wie das der Sektion S der Abteilung A des NDRC verfügte diese, oder war doch verfügungsberechtigt, über 136 000 Dollar für eine Aufgabe, die sich als wertvoll erwies, aber sich an Bedeutung mit der Uraniumforschung offensichtlich nicht vergleichen ließ[1].

Reorganisation des Komitees im Sommer 1941

3.14. Das im Sommer 1940 gebildete Uraniumkomitee setzte seine Tätigkeit praktisch unverändert bis zum Sommer 1941 fort. Dann wurde das Hauptkomitee etwas erweitert und es wurden Unterkomitees eingesetzt für Isotopentrennung, theoretische Gesichtspunkte, Energieerzeugung und schweres Wasser.

Abteilung Uranium: *Briggs,* Vorsitzender; *Pegram,* Vizevorsitzender; *S. K. Allison, Beams, Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth, Urey.*

Unterabteilung Isotopentrennung: *Urey,* Vorsitzender; *Beams.*

Unterabteilung Energieerzeugung: *Pegram,* Vorsitzender; *Allison, Fermi, Smyth, Szilard.*

Unterabteilung schweres Wasser: *Urey,* Vorsitzender; *T. H. Chilton.*

Unterabteilung theoretische Aspekte: *Fermi,* Vorsitzender; *Breit, C. H. Eckart, Smyth, Szilard, J. A. Wheeler.*

Das Komitee hieß von jetzt ab Uranium-Sektion oder S-1-Sektion des NDRC. Wenn auch bis zum Sommer 1942 nicht formell aufgelöst, so wurde es doch im Dezember 1941 weitgehend ersetzt (vergl. Kapitel V).

---

[1] Der Bericht sagt nichts darüber, was das Projekt der Sektion S Abtg. A enthielt.

Das nationale akademische Überwachungskomitee

3.15. Im Frühling 1941 empfand *Briggs,* daß eine unparteiische Kontrolle des ganzen Problems wünschenswert sei, und trat an *Bush* mit der Bitte heran, ein Prüfungskomitee aufzustellen. *Bush* ersuchte dann offiziell *F. B. Jewett,* den Präsidenten der National Academy of Sciences, ein solches Komitee zu ernennen. *Jewett* entsprach dem und ernannte *A. H. Compton* zum Vorsitzenden, ferner *W. D. Coolidge, E. O. Lawrence, J. C. Slater, J. H. Van Vleck* und *B. Gherardi.* (Wegen Erkrankung konnte *Gherardi* nicht mitwirken.) Das Komitee erhielt den Auftrag, die militärische Bedeutung der Uranfrage zu prüfen und die Höhe der Aufwendungen vorzuschlagen, bis zu denen die Erforschung des Problems vorangetragen werden sollte.

3.16. Dieses Komitee tagte im Mai und legte einen Bericht vor. Dieser Bericht und die weiteren sollen im nächsten Kapitel zusammengefaßt werden.) Auf der Grundlage dieses Berichtes und der mündlichen Darlegung von *Briggs* vor der Versammlung des NDRC wurde auf der NDRC-Tagung vom 18. Juli 1941 ein Zuschuß von 267 000 Dollar bewilligt und die Wahrscheinlichkeit ins Auge gefaßt, daß weit größere Ausgaben nötig sein würden. *Bush* verlangte einen zweiten Bericht mit Unterstreichung der technischen Gesichtspunkte; um dieses Verlangen zu befriedigen, wurden *O. E. Buckley* von dem Bell Telephone Laboratorium und *L. W. Chubb* von der Westinghouse Electrical and Manufacturing Company dem Komitee beigegeben. (*Compton* war während des Sommers in Südamerika und konnte infolgedessen an den Zusammenkünften jener Zeit nicht teilnehmen.) Der zweite Bericht wurde von *Coolidge* vorgelegt. Auf Grund der Ergebnisse neuer Messungen über den Wirkungsquerschnitt der Spaltung von U-235 und in der wachsenden Überzeugung, daß die Isotopentrennung möglich sei, legten im September 1941 *Compton* und *Lawrence J. B. Conant* von dem NDRC, der mit *Bush* zusammenarbeitete, nahe, daß ein dritter Bericht wünschenswert sei. Da *Bush* und *Conant* im Sommer 1941 erfahren hatten, daß auch die Engländer zusehends optimistischer wurden, richtete man an das Komitee das Ersuchen, eine neue Prüfung des ganzen Projektes vorzunehmen. Zu diesem Zweck wur-

den dem Komitee *W. K. Lewis, R. S. Mulliken* und *G. B. Kistiakowsky* zugegeben. Diesen dritten Bericht unterbreitete *Compton* am 6. November 1941.

Mitteilungen aus England

3.17. Anfang 1940 kam es zu einem gewissen Austausch von Informationen mit den englischen Forschern, und während des Sommers 1941 erfuhr *Bush*, daß die Engländer die ganze Sachlage in der Zeit vom April bis Juli neu überprüft hätten. Sie hatten sich auch für die Möglichkeit, Plutonium zu benutzen, interessiert; tatsächlich war in einem Brief von *J. D. Cockcroft* an *R. H. Fowler* vom 28. Dezember 1940 ein Vorschlag enthalten, der die Ratsamkeit, Pu zu untersuchen, betraf. *Fowler* war damals als englischer wissenschaftlicher Verbindungsoffizier in Washington tätig; er leitete *Cockcrofts* Brief an *Lawrence* weiter. Die Engländer haben die Möglichkeit der Pu-Benutzung nicht selbst verfolgt, weil sie der Ansicht waren, daß ihre begrenzte Mitarbeiterschaft auf U-235 konzentriert werden sollte. *Chadwick* zum mindesten war überzeugt, daß eine U-235-Bombe von großer Zerstörungskraft hergestellt werden könne, und die ganze englische Forschungsgruppe ahnte, daß die Trennung von U-235 durch Diffusion wahrscheinlich durchführbar sei.

3.18. Während des Sommers 1941 wurden Nachrichten über die britische Auffassung, einschließlich des ersten Entwurfs des britischen Berichtes über den Gegenstand, *Bush* und *Conant* inoffiziell zugänglich, obwohl der offizielle britische Bericht vom 15. Juli *Conant* erst später, nämlich am 3. Oktober durch *G. P. Thomson* übermittelt wurde. Da der britische Bericht jedoch dem Komitee der National Academy of Sciences nicht zugänglich gemacht worden war, bildeten die Berichte des Academy Committee und die britischen Berichte voneinander unabhängige Schätzungen über die Aussichten der Atombombenproduktion.

3.19. Außer den offiziellen und halboffiziellen Zusammenkünften gab es mancherlei weniger formelle Diskussionen; eine davon wurde von *M. L. E. Oliphant* aus England gelegentlich seines Besuches in unserem Lande im Sommer 1941 angeregt. Als weiteres Beispiel solch zwangloser Fühlungnahmen seien die

Besprechungen zwischen *Conant, Compton* und *Lawrence* in der Universität von Chicago erwähnt, die bei dem 50jährigen Jubiläum der Universität im September 1941 stattfanden. Der allgemeine Beschluß lautete, das Programm zu fördern, und dieser Beschluß wurde *Bush* in verschiedenen Formen von einer ganzen Reihe von Personen übermittelt.

3.20. Im Herbst 1941 wurden *Urey* und *Pegram* nach England geschickt, um Informationen aus erster Hand über die dortige Tätigkeit zu bekommen. Es war das erstemal, daß eine Anzahl Amerikaner speziell wegen des Uranproblems in England war. Der Bericht, den *Urey* und *Pegram* abfaßten, bestätigte und erweiterte die Informationen, die man schon vorher erhalten hatte.

Beschluss zu erweitern und zu reorganisieren

3.21. Als Folge der Berichte des National Academy Committee, der Briten und von *Urey* und *Pegram* und auf das allgemeine Drängen einer ganzen Anzahl von Physikern hin beschloß *Bush* als Direktor des Amtes für wissenschaftliche Forschung und Entwicklung (Office of Scientific Research and Development), zu dem auch das NDRC gehört, daß die Uraniumarbeit nachdrücklicher gefördert werden sollte.

3.22. Noch bevor die National Academy ihren dritten Bericht herausgab und ehe *Pegram* und *Urey* England besuchten, hatte *Bush* die ganze Uraniumfrage bei Präsident *Roosevelt* und Vizepräsident *Wallace* angeschnitten. Er faßte vor beiden die im allgemeinen optimistischen britischen Ansichten kurz zusammen und verwies auf die Unsicherheiten der Voraussagen. Der Präsident stimmte zu, daß es wünschenswert sei, das Programm zu verbreitern, eine andere Organisation zu schaffen, Geldmittel aus einer besonderen Quelle vorzusehen und einen vollständigen Informationsaustausch mit den Engländern zu vollziehen. Es wurde beschlossen, die Erwägungen über Planungen allgemeinen Charakters der folgenden Gruppe von Personen anzuvertrauen: dem Präsidenten, dem Vizepräsidenten, dem Kriegsminister, dem Generalstabschef, *Bush* und *Conant*. Diese Gruppe wurde oft als oberste Planungsgruppe bezeichnet.

3.23. In der Zeit, als der dritte Bericht der National Academy vorgelegt wurde und *Urey* und *Pegram* aus England zurückkamen, begann der allgemeine Organisationsplan sich abzuzeichnen. Der Bericht der Academy war zurückhaltender als der brische Bericht, wie *Bush* in seinem Brief an Präsident *Roosevelt* vom 27. November 1941 darlegte. Aber er war immerhin optimistisch genug, dem Erweiterungsplan eine zusätzliche Unterstützung zu geben. Die vorgeschlagene Reorganisation wurde an einer Zusammenkunft der Uraniumsektion angekündigt, unmittelbar vor dem Überfall auf Pearl Harbor. Sie wird in Kapitel V beschrieben.

ZUSAMMENFASSUNG

3.24. Im März 1939, nur wenige Wochen nach der Entdekkung der Uraniumspaltung, wurde die Regierung auf die Möglichkeit einer militärischen Bedeutung der Uraniumspaltung aufmerksam gemacht. Im Herbst 1939 wurde das erste Regierungskomitee für Uran gebildet. Im Sommer 1940 wurde eine Einrichtung zur Publikationsbeschränkung wichtiger Arbeiten auf diesem Gebiet geschaffen. Als das NDRC im Juni 1940 konstituiert wurde, erfolgte eine Neuordnung und Unterstellung des Uraniumkomitees unter das NDRC. Trotzdem waren bis zum Herbst 1941 die gesamten Aufwendungen relativ gering. Im Dezember 1941, nach Vorlage des Berichtes der National Academy und der britischen Informationen, entschloß man sich, das Programm zu erweitern und zu reorganisieren.

IV. KAPITEL. FORTSCHRITTE BIS DEZEMBER 1941

DIE UNMITTELBAREN FRAGEN

4.1. Im II. Kapitel sind die allgemeinen Probleme beschrieben worden, die mit der Erzeugung einer Kettenreaktion für militärische Zwecke zusammenhängen. Im Frühsommer 1940 waren die unmittelbar wichtigen Fragen die folgenden:

(1) Kann man irgendwelche Bedingungen finden, unter denen eine Kettenreaktion ablaufen würde?

(2) Kann das Isotop U-235 in größeren Mengen abgetrennt werden?

(3) Kann Bremsstoff und anderes Material in genügender Reinheit und Menge hergestellt werden?

Obwohl es viele Nebenprobleme gab, wie das aus dem Bericht über die Fortschritte in den folgenden 18 Monaten hervorgeht, bestimmten doch diese drei Fragen den Gang des Unternehmens.

DIE KETTENREAKTION

DAS PROGRAMM VOM 15. JUNI 1940

4.2. Im Juni 1940 war fast die ganze Forschungsarbeit über die Kettenreaktion an der Columbia-Universität unter der Oberleitung von *Pegram* mit *Fermi* und *Szilard* als unmittelbar verantwortlichen Mitarbeitern konzentriert. Man war zum Schluß gekommen, daß das am leichtesten durchführbare Verfahren einer Kettenreaktion wahrscheinlich dasjenige mit Hilfe von Spaltung durch Neutronen thermischer Geschwindigkeit in einer Kombination von Graphit und Uran sei. Im Frühling 1940 hatten *Fermi, Szilard* und *H. L. Anderson* die Genauigkeit der Messungen der Einfangwirkungsquerschnitte von Kohlenstoff für Neutronen verbessert, ferner die Messungen der Wirkungsquerschnitte der Resonanzabsorption (bei mittleren Geschwindigkei-

ten) von Neutronen des Uran-238 und der Bremsung der Neutronen im Kohlenstoff.

4.3. *Pegram* schrieb in einem Memorandum vom 14. August 1940 an *Briggs:* «Es ist nicht so leicht, diese Beträge genau zu messen, wenn nicht reichliches Material zur Verfügung steht. Die »Netto«-Resultate dieser Experimente vom Frühjahr 1940 ergaben, daß die Möglichkeit einer Kettenreaktion nicht endgültig erwiesen ist, aber weit weniger, daß sie endgültig nicht möglich sei. Im ganzen sind die Ergebnisse viel günstiger als alle Schlüsse, die man billigerweise aus den früheren Resultaten hatte ziehen können.»

4.4. Auf einer Zusammenkunft vom 15. Juni (siehe Kapitel III) wurden diese Resultate erörtert, und es wurde empfohlen, daß A) weitere Messungen über die Kernkonstanten gemacht werden sollten, und daß B) Versuche unternommen werden sollten mit Gitteraufbauten von Uranium und Kohlenstoff, die Uraniummengen von $^1/_5$ bis $^1/_4$ der schätzungsweise kritischen Beträge enthalten sollten.

Fortschritt bis 15. Februar 1941

4.5. *Pegrams* Bericht vom 15. Februar 1941 zeigt, daß die bis dahin vollbrachte Leistung sich überwiegend auf die Aufgabe A) bezog, während die Aufgabe B), das sogenannte Zwischenexperiment, durch Materialmangel verzögert wurde.

4.6. In Erläuterung von *Pegrams* Bericht können wir sagen, daß der Fortschritt in folgendem bestand:

a) *Die Verlangsamung der Neutronen* durch Graphit wurde erforscht durch Untersuchung der Radioaktivierungsintensität mehrerer Detektoren (Rhodium, Indium, Jod), die an verschiedenen Orten innerhalb einer rechteckigen Graphitsäule von 3 mal 3 mal 8 Fuß (etwa 1 mal 1 mal 2,44 m) angeordnet waren, während zugleich eine Neutronenquelle sich darin befand. Durch geeignete Wahl von Cadmiumschirmen wurden die Resonanzeffekte und thermischen Neutronen gesondert untersucht (siehe Fußnote zur Überschrift von 4.8.).

Fußnote des Originaltextes: Die Gegenwart von Neutronen wird mit Ionisationskammern oder Zählern oder induzierter Radioaktivität in verschiedenartigen Metallfolien festgestellt (siehe Anhang 1). Die

Reaktion jedes dieser Detektoren hängt von dessen charakteristischen Eigenschaften und von der Geschwindigkeit der Neutronen ab. (Zum Beispiel sind Neutronen von 1,5 Volt besonders wirksam, Indium zu aktivieren.) Ferner haben bestimmte Stoffe sehr große Absorptionsquerschnitte für Neutronen ganz bestimmter Geschwindigkeiten (zum Beispiel Cadmium für thermische Neutronen). Solche Messungen mit verschiedenen Detektoren mit oder ohne verschiedene Absorber geben einige Aufschlüsse sowohl über die Zahl der vorhandenen Neutronen wie über ihre Energieverteilung. Doch ist der Stand dieser Meßmethoden noch ziemlich roh.

Eine mathematische Analyse der experimentellen Daten auf Grund der Diffusionstheorie ermöglichte es, die Ergebnisse vorauszusagen, die man für verschiedene andere Anordnungen erwarten darf. Diese Ergebnisse, verknüpft mit theoretischen Untersuchungen über die Diffusion thermischer Neutronen, lieferten die Grundlage für künftige Berechnungen der Zahl der thermischen Neutronen und Resonanzneutronen an irgendeinem Punkt eines Graphitblocks gegebener Form, wenn eine gegebene Neutronenquelle an einem bestimmten Platz im oder in der Nähe des Graphitblocks untergebracht ist.

b) *Die bei der Spaltung ausgesandte Neutronenzahl.* Die Versuche mit gebremsten Neutronen zeigten, daß Neutronen von hoher Energie (hoher Geschwindigkeit), wie die aus Spaltung stammenden, praktisch sämtlich zu thermischer Energie (geringer Geschwindigkeit) nach ungefähr 40 oder mehr cm Weg in Graphit abgebremst werden. Ein Uraniumstück, das in einer Zone mit thermischen Neutronen angeordnet wird, absorbiert diese und emittiert, da Spaltung erfolgt, schnelle Neutronen, die leicht von den thermischen Neutronen unterschieden werden können. So wird durch Meßserien mit und ohne Uran und mit verschiedenen Absorbern und Detektoren der Wert der Konstante η (Anzahl der für ein im Uranium absorbiertes thermisches Neutron ausgesandten Neutronen) ermittelt. Das bedeutet nicht die Anzahl der pro Spaltung ausgesandten Neutronen, sondern einen etwas kleineren Wert, da ja nicht jede Absorption zu einer Spaltung führt.

c) *Gittertheorie.* Ausführliche Berechnungen wurden angestellt über die wahrscheinliche Zahl der Neutronen, die aus verschiedenen Formen und Größen der Gitter entweichen. Das war grundlegend für das sogenannte Zwischenexperiment, das wir oben als B) aufgeführt haben (siehe 4.4.).

Aufnahme neuer Programme

4.7. Anfang 1941 führte das Interesse von Persönlichkeiten in Princeton, Chicago und Californien an dem allgemeinen Kettenreaktionsproblem zur Genehmigung gewisser Projekte an deren Instituten. Sodann wurden die Arbeiten dieser Gruppen mit denjenigen an der Columbia-Universität kombiniert und bildeten von da an Teile eines einzigen Programms.

Forschung und Resonanzabsorption

Hierzu enthält der Text folgende Fußnote: Die Bezeichnung «Resonanzabsorption» wird gebraucht, um die sehr starke Neutronenabsorption durch U-238 zu beschreiben, die auftritt, wenn die Neutronenenergie ganz bestimmte Werte innerhalb von 0—1000 Elektronvolt beträgt. Diese Resonanzabsorption weist auf die Existenz von korrespondierenden Energieniveaus in den Kernen hin. Manchmal wird die Bezeichnung Resonanzabsorption auf die ganze Energieregion in der Nachbarschaft des Niveaus bezogen.

4.8. In Kapitel II wurde festgestellt, daß ein Gittersystem oder eine Einheit[1], worin Uran in Klumpen konzentriert und regelmäßig in einer Matrix von Bremsstoff verteilt ist, Vorteile biete. Das war das System, nach dem die Columbia-Gruppe arbeitete. Wie so oft, handelt es sich um eine einfache Grundidee. Bei ho-

[1] Hier wie schon 2.20 und während der ganzen weiteren Texte wird das Wort «pile» benutzt, das vieldeutig ist. Es bedeutet einen Haufen, einen Stoß, einen großen Bau, aber man kann es auch mit «Säule» übersetzen oder auch analog dem französischen Wort «pile» als Element (zum Beispiel in einer elektrischen Batterie). Gemeint sind die wesentlich aus Uran und Bremsstoff bestehenden Einheitsgebilde, die gitterartig gegliedert sind, um aus Uran Pu zu gewinnen und dabei Energie freizugeben. Die deutschen Physiker nannten bei ihren (nicht veröffentlichten) Versuchen diese einheitlich gegliederten Bauwerke «Maschinen». Aber das ist ein ungünstig gewählter Ausdruck für das Wort «pile», denn es handelt sich keineswegs um eine Maschine. Das Wort «Element» müssen wir vermeiden, weil viel von Elementen im Sinne des periodischen Systems die Rede ist. Man kann von Einheitssystemen reden. Der Kürze halber hat der Übersetzer sich entschlossen, in der Regel, wenn Mißverständnisse ausgeschlossen sind, kurzweg «Einheiten» zu sagen. Es sind Einheiten für die Führung der Umwandlungs- und Energiegewinnungsprozesse. Und es kommt später auch die Frage, wie groß die Einheiten sein sollen, ob es besser ist, mehrere kleinere oder eine größere zu verwenden. Es ist also unter «Einheit» von jetzt ab gemeint: eine Konstruktionseinheit, bestehend aus Uran und Bremsstoffen in irgendwelchen Gliederungen und Verteilungen der beiden Hauptkomponenten zur Kernverwandlung und Energiegewinnung, wie sie beispielsweise in 4.6. a) beschrieben ist.

mogener Mischung von Bremsstoff und Uran werden die Neutronen durchschnitlich in kleinen Stufen zwischen den Durchgängen durch die Uranklumpen Energie verlieren, so daß im Verlauf ihrer Bremsung bis zu thermischen Geschwindigkeiten die Wahrscheinlichkeit, daß sie das Uran bei einer bestimmten Geschwindigkeit, z. B. einer solchen, die mit Resonanzabsorption übereinstimmt, durchdringen, groß ist. Wenn dagegen Uran in großen Klumpen und in beträchtlichen Zwischenräumen im Bremsstoff verteilt ist, werden die Unterwegs-Verluste größer, und die Wahrscheinlichkeit, daß die Neutronen gerade mit der Resonanzabsorptions-Geschwindigkeit Uraniumbrocken erreichen, ist relativ klein. Somit verringert sich die Wahrscheinlichkeit der Absorption durch Uran-238, die zu U-239 führt, zu gunsten der Wahrscheinlichkeit thermischer Spaltungseinfänge eventuell so weit, daß die Kettenreaktion zustande kommt. Würde man die genauen Wirkungsquerschnitte jedes Uraniumisotops für jeden Absorptionstypus und jeden Bereich der Neutronengeschwindigkeit kennen, und besäße man die gleichen Kenntnisse für den Bremsstoff, dann könnte man die optimale Gittergliederung, das heißt die beste Größe, Form und Verteilung der Uranbrocken in der Matrix des Moderators, vorausberechnen. Aber man hatte davon nur einige Daten. Und so lag der Versuch einer direkten experimentellen Annäherung nahe. Folglich wurde vorgeschlagen, die Absorption der Neutronen durch Uran unter solchen Bedingungen zu messen, die ähnlich denen sind, die man bei einer Kettenreaktionseinheit mit Graphit als Bremsstoff erwarten mußte.

4.9. Solche Versuche wurden an der Columbia-Universität begonnen und im Februar 1941 in Princeton fortgesetzt — und zwar wesentlich Neutronenabsorptionsstudien in Energiebezirken von einigen tausend Elektronvolt bis zu thermischen Energien, das heißt Bruchteilen von einem Elektronvolt. Dabei erfolgte die Absorption in verschiedenen Schichten von in eine Graphitsäule eingebettetem Uran oder Uranoxyd.

4.10. Die bei diesen Versuchen benutzte Neutronenquelle bestand aus einem Cyclotron, das Protonen auf eine «Berylliumscheibe» (target) schoß. (Die resultierende Neutronenausbeute entsprach einer Radiumberylliumquelle von zirka 3 500 Curie-

Einheiten[1].) Die so erzeugten Neutronen hatten eine breite kontinuierliche Geschwindigkeitsverteilung und traten aus der Quelle in einen großen Graphitblock ein. Die Uran- oder Uranoxydkugeln wurden innerhalb des Graphitblocks in verschiedenen Lagen mit wachsenden Distanzen von der Neutronenquelle verteilt, und so die Absorption der Neutronen bei abnehmenden Durchschnittsgeschwindigkeiten bis herunter zu thermischen Geschwindigkeiten untersucht. Man fand, daß sich die Totalabsorption der Neutronen durch solche Kugeln als Oberflächen- und als Masseneffekt ausdrücken lasse.

4.11. Diese Versuche, mit mannigfaltigen Kugelgrößen-, -dichten und -lagen ausgeführt, würden bis ins Frühjahr 1942 fortgesetzt; dann wurde die Gruppe größtenteils nach Chicago übergeführt (von Princeton). Ähnliche Experimente, die später an der Universität Indiana von A. C. G. Mitchell und seinen Mitarbeitern durchgeführt wurden, bestätigten und verbesserten in einigen Fällen die Ergebnisse von Princeton. Aber die Princeton-Resultate waren im Sommer 1941 hinreichend genau, um bei der Planung der Versuche mit der Probeeinheit und bei den darauffolgenden Versuchen mit den Betriebseinheiten dienlich zu sein. (Einheiten gleich «piles» siehe vorangehende Fußnote.)

4.12. Die Princeton-Versuche über Resonanzabsorption wurden von *R. R. Wilson, E. C. Creutz* und ihren Mitarbeitern ausgeführt unter der allgemeinen Oberleitung von *H. D. Smyth,* mit dauernder Unterstützung von *Wigner* und *Wheeler* und unter häufiger Fühlungnahme mit der Columbiagruppe.

Die ersten Zwischenexperimente

4.13. Etwa Juli 1941 wurde die erste Versuchseinheit mit einer Gitterstruktur von Graphit und Uran an der Columbia-Universität aufgebaut. Sie bestand aus einem Graphitwürfel von ungefähr 8 Fuß (zirka 245 cm) Seitenlänge und enthielt zirka 7 Tonnen Uranoxyd in Eisenbehältern in gleichen Abständen in Graphit verteilt. Eine vorläufige Meß-Serie wurde damit im August 1941 gemacht. Ähnliche Aufbauten, jedoch etwas größer, wur-

---

[1] Eine Curie-Einheit ist diejenige Strahlung, die von 1 gr Radium geliefert wird.

den während des September und Oktober errichtet und untersucht, und die sogenannte Exponentialmethode (weiter unten beschrieben) zur Ermittlung des Vermehrungsfaktors (Multiplikationsfaktors) wurde entwickelt und zuerst angewendet. Diese Arbeit wurde von *Fermi* und seinen Mitarbeitern *H. L. Anderson, B. Feld, G. Weil* und *W. H. Zinn* durchgeführt.

4.14. Die experimentelle Bestimmung des Vermehrungsfaktors k erfolgt ähnlich wie die schon dargelegte Bestimmung von η, das heißt der Zahl der erzeugten Neutronen pro absorbiertes Neutron. Eine Radium-Beryllium-Neutronenquelle wird in der Nähe des Bodens eines gegitterten Aufbaus angebracht, und die Zahl der Neutronen innerhalb dieses Aufbaus an verschiedenen Punkten gemessen. Diese Zahlen werden dann mit den korrespondierenden Zahlen verglichen, die sich ergeben, wenn kein Uran in der Graphitmasse enthalten ist[1]. Offenbar wirkt die Absorption der Neutronen durch U-238 (wobei U-239 entsteht) in der Richtung, die Neutronenzahl zu verringern, während im Gegensatz dazu die Kernspaltung die Neutronenzahl vermehrt. Die Frage ist: was überwiegt? Genauer: überwiegt die Spaltprozeßerzeugung über alle Neutronenbeseitigungsprozesse und Entweichungsverluste? Die Deutung der Ergebnisse in dieser entscheidenden Frage hat viele Korrekturen, Berechnungen und Schätzungen zur Voraussetzung, aber schließlich mündet sie in die Feststellung einer einzigen Zahl, des Multiplikationsfaktors k.

Der Vermehrungsfaktor (Multiplikationsfaktor) k

4.15. Erfolg oder Scheitern des Uraniumprojekts hing von dem Faktor k ab, der auch manchmal Reproduktionsfaktor genannt wird. Konnte man k in einem praktisch durchführbaren System größer als 1 machen, dann mußte das Unternehmen gelingen; wenn nicht, so blieb die Kettenreaktion immer nur ein Traum. Das wird in der folgenden Diskussion, die auf jedes System mit Spaltungsprozessen anwendbar ist, klar. Wir nehmen an, es sei zu einer gegebenen Zeit in dem System (mit spaltbaren Kernen) eine gewisse Zahl freier Neutronen vorhanden. Einige

[1] Im letzteren Falle handelt es sich nur um die Verteilung der Neutronen, die von der Radium-Berylliumquelle ausgingen. Die Differenz der beiden Versuche ergibt die Wirkung des Urans.

von diesen Neutronen werden selbst Spaltungen einleiten und so direkt weitere Neutronen hervorbringen. Der Vermehrungsfaktor k ist das Verhältnis von diesen neu erzeugten Neutronen zu der Zahl der vorher vorhandenen freien Neutronen. Wenn zum Beispiel in einer gegebenen Reaktionseinheit mit Uran, Graphit, Verunreinigungen, Behälter etc. 100 Neutronen durch Spaltung erzeugt wurden, werden davon einige im Uran, ohne Spaltung zu verursachen, absorbiert; einige werden im Graphit absorbiert, andere in den Behältern oder Verunreinigungen, und schließlich werden einige Spaltung und damit zugleich neue Neutronen erzeugen (siehe Figur auf Seite 55). Wenn die Zahl der Spaltprozesse groß genug und jeder Spaltprozeß genügend wirksam ist, dann werden mehr als 100 Neutronen erzeugt, und das System liefert eine Kettenreaktion. Ist zum Beispiel die Zahl der neuen Neutronen 105, so ist der Wert von k = 1,05. Ist aber bei 100 ursprünglichen die Anzahl der neuen Neutronen nur 99, dann ist der Wert von k = 0,99, und es kann sich keine Kettenreaktion aufrechterhalten.

4.16. Das Vorexperiment oder Exponentialexperiment, das wir oben beschrieben haben, stellte sich als zu klein heraus und konnte keine Kettenreaktion liefern; von größtem Interesse war daher die Frage, ob eine größere Einheit von der gleichen Gitterstruktur eine solche Kettenreaktion liefern würde. Das kann man dadurch bestimmen, daß man den Faktor k für eine unbegrenzt große Gitterkonstruktion des gleichen Typs berechnet. Mit anderen Worten, man hatte zu berechnen, welchen Wert k annehmen werde, wenn (zufolge der unbegrenzten Ausdehnung) keine Neutronen seitlich aus der Reaktionseinheit entweichen. Tatsächlich fand man, daß, wenn eine solche Kettenreaktionseinheit die kritische Größe genügend überschreitet — etwa zwei- bis dreimal so groß ist — und wenn sie ferner umhüllt ist von einer Art von Reflektor (für Neutronen), der effektive Wert für k nur wenig von dem Wert abweicht, der sich für eine «unendliche Ausdehnung» des Aufbaues ergibt, vorausgesetzt, daß k in der Nähe von 1 ist. Als Konsequenz dieser Überlegung wurde es gebräuchlich, die Kettenreaktionschancen der verschiedenen Kombinationen von Metall und Bremsstoff durch den Wert von k_{∞} zu charakterisieren, das heißt also durch denjenigen Wert der

Multiplikationskonstanten k, der für eine unbegrenzte Größe der Reaktionseinheit gilt.

4.17. Der Wert von k_∞, den *Fermi* im Herbst 1941 der Uraniumsektion mitteilte, war ungefähr 0,87. Dieser Wert beruhte auf den Resultaten des zweiten Columbia-Vorversuchs. Alles wies darauf hin, daß der Multiplikationsfaktor durch größere Reinheit der Materialien, verbesserte Gitteranordnung und dergleichen erhöht werden könne. Aber niemand konnte mit Sicherheit sagen, daß er größer als 1 gemacht werden könne.

Experimente mit Beryllium

4.18. Ungefähr zur gleichen Zeit, als die Untersuchung über Resonanzabsorption in Princeton in Angriff genommen wurde, begann *S. K. Allison* auf Vorschlag von *A. H. Compton* in Chicago seine Arbeit auf Grund eines Kontraktes, der vom 1. Januar 1941 bis 1. August 1941 lief. Die Ziele dieser Unternehmung waren Untersuchungen a) über die Steigerung der Neutronenerzeugung durch Einschluß der Reaktionseinheit in einem Berylliummantel als Reflektor und b) der Wirkungsquerschnitt von Beryllium. Am 18. Juli 1941 wurde ein neuer Kontrakt, der bis 30. Juni 1942 lief, abgeschlossen. Er stellte die etwas erweiterte Aufgabe, Systeme aus Uranium, Beryllium und Graphit im allgemeinen zu untersuchen. Die dazu zur Verfügung gestellten Mittel waren bescheiden: 9 500 Dollar für den ersten Kontrakt und 30 000 Dollar für den zweiten.

4.19. Wie vorher im II. Kapitel dargelegt, hat Beryllium wünschenswerte Eigenschaften als Bremsstoff wegen seines geringen Atomgewichtes und seines geringen Wirkungsquerschnitts für Neutronenabsorption; auch bestand die Möglichkeit, daß durch eine (n, 2n)-Reaktion im Beryllium ein Beitrag zur Anzahl der Neutronen geliefert werde. Der Wert des Wirkungsquerschnittes war nicht genau bekannt; außerdem war es durchaus ungewiß, ob eine genügende Menge reines Beryllium erhältlich sei. Im wesentlichen war Allisons Aufgabe ähnlich der der Columbia-Universität gestellten, mit dem Unterschied, daß letztere an Stelle von Beryllium die Benutzung von Graphit vorsah. Wegen der Knappheit des Berylliums hatte man vorgeschlagen, es in Ver-

bindung mit Graphit oder einem anderen Bremsstoff und möglicherweise als Reflektor zu benutzen.

4.20. In den Experimenten von Chicago erzeugte man Neutronen mit Hilfe des Cyclotrons und ließ sie in eine Reaktionseinheit von Graphit und Beryllium eintreten. Allison machte eine Anzahl Messungen über die Bremsung und Absorption im Graphit, die sich als wichtige Kontrollversuche zu ähnlichen Experimenten an der Columbia-Universität herausstellten. Schließlich bekam er genug Beryllium und konnte wichtige Messungen vornehmen, die ergaben, daß Beryllium als Moderator ähnliche Eigenschaften wie Graphit hat. Trotzdem wurde Beryllium praktisch nicht in großem Umfange benutzt mit Rücksicht auf die großen Schwierigkeiten, es in hinreichender Menge und in den nötigen Formen zu erzeugen.

4.21. Die oben beschriebene Chicago-Untersuchung wurde ein Teil des Metallurgical Laboratory-Projekts (ML), das an der Universität von Chicago zu Beginn des Jahres 1942 aufgestellt wurde.

Theoretische Arbeiten

4.22. Sowohl die Vorexperimente an der Columbia-Universität als auch die fortgesetzten Untersuchungen über Resonanzabsorption in Princeton machten sorgfältige theoretische Auswertungen notwendig. *Fermi* arbeitete die Theorie der «Exponential»-Einheit aus und *Wigner* die der Resonanzabsorption; beide trugen dauernd zu der Lösung der verschiedenen Probleme bei. Auch *Wheeler* in Princeton, *Breit* in Wisconsin und *Eckart* in Chicago — um nur einige zu nennen — trugen zu der allgemeinen Theorie der Reaktionseinheiten und der damit verbundenen Themen bei. Zusammenfassend kann man sagen, daß Ende 1941 die allgemeine Theorie der Kettenreaktion für langsame Neutronen im wesentlichen klargestellt war. Ungewiß blieben noch zahlenmäßige Konstanten und technische Ausführungsfragen.

4.23. Auch in der Theorie der Reaktion schneller Neutronen in U-235 wurde ein beträchtlicher Fortschritt erzielt. Im einzelnen wurde die kritische Größe neu abgeschätzt und vorausgesagt, daß ungefähr 10 % der Gesamtenergie in einer Explosion frei würden. Unter dieser Voraussetzung ergäbe 1 kg U-235 das Äquiva-

lent von 2 000 Tonnen TNT. Die Schlußfolgerungen werden weiter unten in Verbindung mit dem National Academy-Bericht gewürdigt. Man erinnere sich, daß hier zwei Faktoren eine Rolle spielen: 1. welcher Bruchteil der zur Verfügung stehenden Spaltungsenergie frei wird, bevor die Reaktion zum Stillstand kommt; 2. wie groß die Zerstörungswirkung einer solchen hochkonzentrierten Explosion sein würde.

Die Plutoniumarbeit

4.24. Im II. Kapitel wurde erwähnt, daß das Element 94, später Plutonium genannt, durch Betastrahlenabbau von Uran 239 gebildet wird; Uran 239 selbst entsteht durch Neutronenabsorption seitens des Urans 238; schließlich hatte man angenommen, daß Plutonium wahrscheinlich ein Alphastrahler von großer Halbwertzeit sei und sich durch Neutronenbeschießung aufspalten lasse. Im Sommer 1940 drang man darauf, daß die Kernphysikgruppe an der California-Universität in Berkeley mit Hilfe ihres mächtigen Cyclotrons Neutronen erzeugen und mit ihnen (durch Bombardierung von Uran 238) Plutonium gewinnen solle, um es sodann vom Uran zu trennen und seine Spaltungseigenschaften zu untersuchen. *E. Segré, G. T. Seabord, J. W. Kennedy* und *A. C. Wahl* in Berkeley führten von 1941 verschiedene derartige Experimente durch und berichteten im Mai 1941 darüber durch *E. O. Lawrence* an das National Academy Committee (siehe unten). Einen weiteren Bericht erstatteten sie in einem Memorandum, das dem zweiten Rechenschaftsbericht des Komitees vom 11. Juli 1941 einverleibt wurde. Man wird sehen, daß dieses Memorandum eine wichtige Idee enthält, die von anderen nicht besonders hervorgehoben wurde (siehe 1.58.), nämlich eine große Menge Plutonium für den Gebrauch in einer Bombe herzustellen.

4.25. Aus Lawrences Memorandum sei folgende Notiz wiedergegeben: «Seit dem ersten Bericht des National Academy of Sciences-Komitees über die Atomspaltung ergab sich eine ungemein wichtige neue Möglichkeit für die Ausnutzung einer Kettenreaktion mit nichtgetrennten Isotopen des Urans. Experimente im Strahlenlaboratorium der Universität von Californien zeigten, a) daß das Element 94 sich als Resultat des Neutroneneinfangs

durch Uran 238 bildet, dem zwei Betaumwandlungen sukzessiv folgen; b) daß dieses Transuran mit Hilfe von langsamen Neutronen spaltbar ist und sich voraussichtlich ähnlich wie Uran 235 verhält.

«Daraus dürfte hervorgehen: Wenn eine Kettenreaktion ohne Trennung der Isotopen herbeigeführt werden kann, mag es zulässig sein, während einer gewissen Zeit mit der speziellen Herstellung des Elementes 94 in beträchtlichen Mengen rasch voranzugehen. Dieser Stoff kann durch gewöhnliche chemische Methoden extrahiert werden und würde für die Zwecke der Kettenreaktion voraussichtlich dem Uran 235 gleichwertig sein.

«Wenn es sich so verhält, so eröffnen sich folgende drei außerordentlich wichtige Möglichkeiten:

«1. U-238 würde für die Energieerzeugung nutzbar sein, und dadurch würde die aus einer gegebenen Menge von Uran gewinnbare Atomenergie auf das Hundertfache steigen.

«2. Mit dem Element 94 könnte man die Herstellung kleiner Kettenreaktionseinheiten für Energiezwecke ins Auge fassen, die etwa nur 100 Pfund statt der bei Benutzung von natürlichem Uran notwendigen 100 Tonnen für eine solche Einheit wiegen würden.

«3. Hätte man reichliche Mengen des Elements 94 zur Verfügung, so wäre es wahrscheinlich, daß man eine Kettenreaktion mit schnellen Neutronen erzeugen könnte. Bei einer solchen Reaktion würde Energie von derart explosiver Gewalt frei, daß man sie als ,Superbombe' bezeichnen könnte.»

Radioaktive Gifte

4.26. Wie schon oben festgestellt, sind die Bruchstücke der Spaltprozesse in den meisten Fällen unstabile Kerne, d. h. künstliches radioaktives Material. Man weiß allgemein, daß die Strahlung der radioaktiven Substanzen tödliche Wirkungen hat ähnlich den Wirkungen der Röntgenstrahlen.

4.27. In einer Kettenreaktionseinheit bilden sich diese radioaktiven Spaltprodukte in dem Maße, als die Reaktion fortschreitet. (Sie haben sich tatsächlich als der am meisten störende Faktor einer Reaktionseinheit herausgestellt.) Da sie chemisch vom Uran verschieden sind, muß es möglich sein, sie zu extrahieren

und ähnlich zu benutzen wie eine besonders schädliche Art von Giftgas. Dieser Gedanke wurde in dem National Academy Report erwähnt (vergl. § 4.48) und in einem Bericht weiter ausgeführt, den *E. Wigner* und *H. D. Smyth* am 10. Dezember 1941 niederschrieben. Die beiden Autoren kamen zu dem Schluß, daß die Spaltprodukte, die eine 100 000 kw-Kettenreaktionseinheit an einem Tag erzeugt, ausreichen würden, um ein beträchtliches Gebiet unbewohnbar zu machen.

4.28. Wigner und Smyth empfahlen nicht, radioaktive Gifte zu benutzen. Auch von anderen verantwortlichen und maßgebenden Stellen wurde deren Verwendung späterhin nicht ernstlich vorgeschlagen. Wohl aber stellte man ernsthafte Überlegungen darüber an, ob die Deutschen nicht überraschenden Gebrauch von radioaktiven Giften machen würden, und für diesen Fall wurden Abwehrmaßnahmen geplant.

ISOTOPENTRENNUNG

Trennung in kleinem Masstab mit Hilfe des Massenspektrographen

4.29. In Kapitel I wurde erwähnt, daß die Uranspaltung durch thermische Neutronen als experimentell gesichertes Ergebnis dem Isotop U-235 zuzuschreiben ist. Dieses Ergebnis war durch Trennung winziger Quantitäten des Uranisotops in einem Massenspektrograph von *A. O. Nier* gewonnen worden; man hatte darauf die Kerneigenschaften dieser Proben studieren können. Im Sommer 1941 lieferte Nier zusätzliche kleine Mengen, die *N. P. Heydenburg* und andere im Laboratorium von *M. A. Tuve* in der Abteilung für Erdmagnetismus im *Carnegie-Institut* in Washington untersuchten. Jedoch waren die Resultate dieser Experimente noch vorläufige, und es ist klar, daß man wünschen mußte, mit reichlicheren Mengen von vollständig separierten Stoffen genaue Studien zu machen.

4.30. Die Notwendigkeit, größere Proben von U-235 zu besitzen, veranlaßten *E. O. Lawrence,* in Berkeley eine elektromagnetische Trennung durchzuführen. Seine Erfolge waren bemerkenswert, und am 6. Dezember 1941 berichtete er, daß er in einer Stunde

ein Mikrogramm[1] U-235 niederschlagen könne, von dem ein großer Teil U-238 abgetrennt sei.

4.31. Schon vorher hatte *Smyth* von Princeton auf einer Konferenz des Uran-Komitees die Frage der Möglichkeit einer Isotopentrennung in größerem Maßstab durch elektromagnetische Mittel angeschnitten; aber man hatte ihm erwidert, daß man sie untersucht habe und sie für undurchführbar halte. Bei einem gelegentlichen Zusammentreffen im Oktober 1941 diskutierten *Smyth* und *Lawrence* nichtsdestoweniger das Problem von neuem und kamen zu der Ansicht, daß es vielleicht doch lösbar sei. *Smyth* regte die Frage am 6. Dezember auf einer Konferenz erneut an und bei dem folgenden Zusammentreffen (18. Dezember 1941) kam es zu einer allgemeinen Diskussion über die elektromagnetischen Trennmethoden in großem Maßstab, in Verbindung mit Lawrences Bericht über seine soeben erwähnten Resultate. Über die Folgen dieser Diskussion ist in Kapitel XI berichtet.

Zentrifugierungs- und Gasdiffusionsmethode

4.32. Obwohl dargelegt wurde, daß die Trennung von U-235 von U-238 von fundamentaler Bedeutung für den ganzen Erfolg des Projektes sein könne, wurde doch bisher noch wenig über die Bemühungen auf diesem Gebiet gesagt. Die diesbezüglichen Arbeiten gingen vom Sommer 1940 an unter der allgemeinen Leitung von *H. C. Urey* von der Columbia-Universität vor sich. Da dieser Teil der Uranarbeiten durch die Reorganisation im Dezember 1941 nicht sehr stark berührt wurde, kann der Bericht hierüber für die Kapitel IX und X aufgespart werden. An dieser Stelle sei lediglich eine Zusammenfassung gegeben:

4.33. Nach sorgfältiger Prüfung und einem beträchtlichen experimentellen und sonstigen Aufwand für andere Methoden kam man zum Schluß, daß die beiden aussichtsreichsten Wege, größere Mengen U-235 von U-238 zu trennen, in der Benutzung von Zentrifugen und in der Benutzung von Diffusion durch poröse Wände beständen. Wegen der sehr geringen Massendifferenz sind die Kräfte, die auf die beiden Isotope in der Zentrifuge wirken, nur sehr wenig verschieden. Bei

[1]Mikrogramm $= 10^{-6}$ oder 1 Millionstel Gramm.

der Diffusion durch Wände ist der Diffusionsgrad für die beiden Isotopen auch wenig verschieden, wiederum wegen ihrer geringen Massendifferenz. Bei beiden Methoden muß das Uran in Gasform benutzt werden, was eine unmittelbare und ernsthafte Einschränkung bedeutet, denn die einzige damals bekannte gasförmige Verbindung war Uran-Hexafluorid. Bei jeder der beiden Methoden konnte man von einem einzigen Prozeß oder von einer einzigen Stufe nur eine sehr geringe Anreicherung erwarten; und daraus ergab sich, daß viele aufeinanderfolgende Stufen notwendig sein würden, um einen hohen Grad der Anreicherung zu erzielen.

4.34. Ende 1941 war jede der beiden Methoden prinzipiell durch Experimente gesichert; das bedeutete: Einstufenseparatoren erzielten eine Anreicherung von U-235 in einem laboratoriumsmäßigen Versuch bis zu ungefähr dem theoretisch geschätzten Grade. *K. Cohen* von der Columbia-Universität und andere hatten eine Theorie für Einstufeneinheiten und für Serien oder Kaskaden von Einheiten, die dafür nötig sind, entwickelt. Auf diese Weise konnte man abschätzen, daß für einen bestimmten Typ eines Diffusionssystems 5 000 Stufen notwendig seien und daß eine Diffusionswandfläche von vielen Acres[1] notwendig wäre, um in einer Anlage täglich 1 kg U-235 abzutrennen. Der Kostenaufwand hierfür ließ sich auf einige zehn Millionen Dollars abschätzen. Für die Zentrifugenmethode war die Anzahl der Stufen kleiner, aber man konnte voraussagen, daß eine ähnlich große Produktion durch Zentrifugen 22 000 Zentrifugen von extrem hoher Geschwindigkeit, jede mit separatem Antrieb und jede drei Fuß lang, erfordern würde und damit auch entsprechende Kosten.

4.35. Natürlich konnten solche Kostenschätzungen nicht genau gemacht werden, denn die technologischen Probleme waren ja meist ganz ungelöst. Aber die Veranschlagungen der Größe und der Kosten einer solchen Anlage dienten dazu, den Umfang einer solchen Unternehmung hervorzuheben.

Thermische Diffusion in Flüssigkeiten

4.36. Im September 1940 unterbreitete *P. H. Abelson Briggs* ein Memorandum von 17 Seiten, das die Möglichkeit der Uran-

---

[1] 1 Acre = 0,4047 Hektar = $0{,}4047 \cdot 10^4$ m^2.

isotopentrennung durch thermische Diffusion in flüssigem Uran-Hexafluorid zum Gegenstand hatte. *R. Gunn* aus dem Naval Research Laboratory war ebenfalls am Uranproblem sehr interessiert und wurde zum Mitglied des Uran-Komitees ernannt, als es unter dem NDRC im Sommer 1940 reorganisiert wurde. Zufolge von *Abelsons* Vorschlag und *Gunns* Interesse begann man Untersuchungen über die thermische Diffusion in dem National Bureau of Standards. Finanziert wurde diese Untersuchung durch Fonds des Navy Department, und im Jahre 1940 wurde die Arbeit in das Naval Research Laboratory verlegt, wo sie unter der Leitung von *Abelson* weitergeführt wurde.

4.37. Wir werden die Frage der thermischen Diffusionsuntersuchungen in einem späteren Kapitel weiterbesprechen und begnügen uns hier mit der Bemerkung, daß schon Ende 1941 bedeutsame Resultate erzielt wurden, und daß im Januar 1942 mit einer einzigen Separationssäule ein Trennfaktor erzielt wurde, der demjenigen vergleichbar oder, besser, überlegen war, den man damals in den Vorversuchen mit der Diffusions- und Zentrifugalmethode erzielt hatte.

Erzeugung von schwerem Wasser

4.38. In Kapitel II wurde dargelegt, daß Deuterium wegen seines kleinen Absorptionsquerschnittes und seiner guten Bremseigenschaften als Bremsstoff vielversprechend war, aber anderseits wegen seiner Knappheit doch wieder geringe Aussicht bot. Das Interesse an Deuterium als Bremsstoff wurde durch experimentelle Resultate neu angeregt, die man in Berkeley gemacht hatte und aus denen hervorging, daß der Absorptionsquerschnitt des Deuteriums für Neutronen praktisch ungefähr null war. Da auch Sauerstoff nur einen sehr kleinen Absorptionskoeffizienten für Neutronen hat, nahm man gewöhnlich an, daß man Deuterium mit Sauerstoff kombiniert verwenden könne, d. h. in einem sehr praktischen Stoff: dem schweren Wasser. Im Februar 1941 begann man an der Columbia-Universität mit Versuchen über praktisch mögliche Methoden, schweres Wasser in großen Quantitäten zu konzentrieren, und zwar unter der Leitung von *H. C. Urey* (mit einem OSRD-Kontrakt). Anfang 1941 berichtete *R. H. Fowler* aus England von dem Interesse der britischen Forscher-

gruppe an Deuterium in Form von schwerem Wasser als Bremsstoff und der Überzeugung dieser Gruppe, daß eine Kettenreaktion in verhältnismäßig kleinen Einheiten von Uran und schwerem Wasser «gehen» müsse.

4.39. *Urey* und *A. von Grosse* hatten bereits die Konzentrierung von schwerem Wasser mit Hilfe von katalytischen Austauschreaktionen zwischen gasförmigem Wasserstoff und Wasser in Betracht gezogen. Dieser Prozeß beruht auf der Tatsache, daß bei Isotopengleichgewicht zwischen Wasserstoffgas und Wasser das Wasser eine drei- bis viermal höhere Konzentration von Deuterium enthält als das Gas. Im Laufe des Jahres 1941 wurde diese Austauschreaktion zwischen Wasser und Wasserstoff an der Columbia-Universität und im Frick Chemical Laboratory zu Princeton untersucht, und es wurden ausgedehnte Arbeiten durchgeführt, um Methoden zur Erzeugung geeigneter Katalysatoren in größerem Maßstab für die Katalysierung der Reaktion zu entwickeln.

4.40. Die weitere Entwicklung dieser Unternehmungen und anderer Methoden, um schweres Wasser zu erzeugen, ist im Kapitel IX erörtert. Wie die übrigen Isotopentrennarbeiten an der Columbia-Universität wurde auch diese von der Reorganisation im Dezember 1941 nur wenig berührt. Der Gegenstand ist hier in vorläufiger Weise erwähnt, um darzulegen, daß alle Hauptrichtungen, um an die Sache heranzukommen, bereits im Jahre 1941 in Erforschung begriffen waren.

ERZEUGUNG UND ANALYSE DER MATERIALIEN

4.41. Ende 1941 waren die Fortschritte in der Produktion des Materials, das man für die Kettenreaktionseinheiten braucht, nicht besonders groß. Das National Bureau of Standards und die Columbiagruppe waren in Kontakt mit der Metal Hydrides Company in Beverly, Massachusetts. Diese Gesellschaft erzeugte etwas Uran in Pulverform, aber ihre Anstrengungen, die Produktion zu steigern und das pulverförmige Material in solide Barren umzuschmelzen, waren nicht besonders erfolgreich.

4.42. In ähnlicher Weise waren auch die Anstrengungen, um größere Mengen von reinem Graphit zu erhalten, ungenügend. Der

an der Columbia-Universität benutzte Graphit kam von der U. S. Graphite Company in Saginaw, Michigan. Als Handelsprodukt war er von hoher Reinheit, aber er enthielt immer noch Bor im Verhältnis 1 : 500 000, und das war unerwünscht.

4.43. Überwiegend durch das Interesse von *Allison* war die Möglichkeit, die Berylliumproduktion zu steigern, ins Auge gefaßt worden, aber mit dem Ergebnis, daß sie zwar wahrscheinlich möglich, aber schwierig und teuer sei.

4.44. Im Gegensatz zu diesem geringen Fortschritt in der Versorgung wurden in Hinsicht auf die Analysen beträchtliche Fortschritte erzielt. Die Ausarbeitung von genügend genauen Methoden der chemischen Analyse der Materialien war eine Aufgabe erster Ordnung während der ganzen Geschichte des Projektes, wenn sie auch gelegentlich durch die mehr im Vordergrund stehenden Probleme in den Schatten gestellt wurde. Während dieser Periode trugen *C. J. Rodden* und andere im National Bureau of Standards die Hauptverantwortung für die Analysen; auch *H. T. Beans* von der Columbia-Universität war daran beteiligt. Im Jahre 1942 hatten mehrere von den anderen Gruppen analytische Sektionen gebildet, die von da an dauernd mitwirkten.

4.45. Zusammenfassend ergab sich Ende 1941, daß hinsichtlich der Versorgung mit genügend Material man nicht vor einer Unmöglichkeit stand, aber immerhin noch weit von der Lösung der Aufgabe entfernt war.

AUSTAUSCH VON INFORMATIONEN MIT DEN ENGLÄNDERN

4.46. Vor dem Herbst 1941 kam es zu einem gewissen Austausch von Berichten mit den Engländern und zu einigen Diskussionen mit Vertretern der britischen Wissenschaft, die in anderer Angelegenheit in diesem Lande weilten. Im September 1941 beschloß man, daß *Pegram* und *Urey* durch eine Reise nach England Informationen aus erster Hand besorgen sollten. Sie führten ihre Reise in der ersten Septemberwoche 1941 durch.

4.47. Die englischen Arbeiten waren im allgemeinen in derselben Richtung gegangen wie die unseren in USA. Hinsichtlich des Kettenreaktionsproblems hatten sie ihre Aufmerksamkeit insbesondere auf schweres Wasser als Bremsstoff gerichtet, mehr

als auf Graphit; in bezug auf die Isotopentrennung hatten sie ausführliche Untersuchungen über die Diffussionsmethode einschließlich einer allgemeinen Kathoden-Theorie durchgeführt. Das wichtigste Ergebnis des Besuches und anderer Wege des Erfahrungsaustausches während des Sommers 1941 lag nicht in genauen wissenschaftlichen Daten, sondern in allgemeinen wissenschaftlichen Eindrücken. Die Engländer und unter ihnen besonders *J. Chadwick* waren überzeugt, daß eine Kettenreaktion mit U-235 durchgeführt werden könne. Sie wußten, daß mehrere kg schweres Wasser pro Tag in Norwegen produziert wurden und daß Deutschland beträchtliche Mengen an Paraffin mit schwerem Wasserstoff bestellt hatte. Man konnte sich schwerlich vorstellen, daß diese Stoffe anders als in der Uranangelegenheit Verwendung finden sollten. So fürchteten die Engländer, daß der Krieg in einigen Wochen zu Ende sein könnte, wenn die Deutschen vor den Alliierten Atombomben hätten. Das Gefühl dafür, wie dringend die Angelegenheit sei, das Pegram und Urey von ihrer Reise zurückbrachten, übte einen starken Einfluß aus.

DER BERICHT DES NATIONAL ACADEMY COMMITTEE

4.48. In Kapitel III ist die Konstituierung des NAC erwähnt worden. Im ersten Bericht dieses Komitees, Mai 1941, waren erwähnt: a) radioaktive Gifte, b) Atomenergie und c) Atombomben. Aber die Betonung lag auf der Atomenergie. Der zweite Bericht unterstrich die Wichtigkeit der neuen mit Plutonium erzielten Resultate, blieb aber unbestimmt hinsichtlich der militärischen Anwendung, zu der man den Spaltungsprozeß entwickeln könne. Beide Berichte drängten darauf, daß man die ganze Aufgabe mit mehr Energie vorantreiben müsse.

4.49. Der dritte Bericht vom 6. November 1941 betraf nun ganz speziell die «Möglichkeiten einer explosiven Kernspaltungsreaktion mit U-235». Während nirgends in den beiden ersten Berichten der National Academy angegeben war, daß Uran wahrscheinlich eine entscheidende Rolle im gegenwärtigen Kriege spielen könne, betonte der dritte Bericht diese Möglichkeit besonders. Es ist deswegen am besten, einige Stellen des Berichtes anzuführen:

«Seit unserem letzten Bericht sind die Fortschritte hinsichtlich der Trennung der Uranisotope so groß geworden, daß folgende Überlegungen dringend sind: 1. die Erfolgswahrscheinlichkeit, eine Atombombe zu erzeugen; 2. der Zerstörungseffekt, den man von ihr erwarten kann; 3. eine Zeitschätzung für die Dauer der Entwicklung und Ingangsetzung der Produktion und 4. eine vorläufige Schätzung ihrer Kosten.

«1. *Die Bedingungen für eine Spaltungsbombe. Eine Spaltungsbombe von überwältigender Zerstörungswirkung wird erzielt durch rasches Zusammenbringen einer genügenden Menge des Elements U-235.* Das erscheint so sicher, wie überhaupt irgendeine Voraussage, die auf Theorie und Experiment beruht, sicher sein kann, bevor man sie experimentell geprüft hat. Unsere Berechnungen sagen uns ferner, daß die benötigten Massen für eine wirksame Reaktion schnell genug zusammengebracht werden können . . . .

«2. *Zerstörungseffekt der Spaltungsbomben.* a) *Die Masse der Bombe. Die Masse des für eine Explosivspaltungsbombe benötigten U-235 unter passenden Bedingungen kann kaum kleiner sein als 2 kg und braucht schwerlich größer zu sein als 100 kg.* Diese weiten Grenzen spiegeln hauptsächlich die experimentelle Unsicherheit wieder, die in bezug auf den Einfangwirkungsquerschnitt von U-235 für schnelle Neutronen besteht . . . . . b) *Die bei explosiver Spaltung freigegebene Energie.* Berechnungen, die für den Fall angestellt wurden, daß die Massen im Anfang zweckmäßig gelagert sind, geben an, daß zwischen 1 und 5 % der Spaltungsenergie des Urans in der Spaltungsexplosion freigegeben werden, das bedeutet: 2 bis $10 \cdot 10^8$ Kilokalorien[1] pro kg U-235. *Die nutzbare Explosionsenergie pro kg Uran ist also ungefähr 300 Tonnen TNT äquivalent.*

«3. *Die für die Entwicklung und für die Erzeugung des benötigten U-235 erforderliche Zeit.* a) *Die Menge des benötigten Urans.* Da die Zerstörungskraft der gegenwärtig benutzten Bomben in der Kriegsführung bereits eine wichtige Rolle spielt, ist es offenbar, daß diese Zerstörungskraft eine entscheidende Bedeutung bekommt, wenn sie auf das 10 000fache erhöht wird.

---

[1] In Worten 2 bis 10 Hundertmillionen Kilokalorien.

«Immerhin wird die Menge des benötigten Urans beträchtlich sein. Vorausgesetzt, daß die Schätzung, mit 500 000 Tonnen TNT könne man Deutschlands militärische und industrielle Objekte zerstören, richtig ist, *würden 1—10 Tonnen Uran-235 für die gleiche Aufgabe nötig sein.*

«b) *Die Trennung von U-235. Die Trennung der Uranisotopen kann im nötigen Umfang durchgeführt werden.* Mehrere Methoden sind in Entwicklung. Mindestens zwei von ihnen scheinen endgültig geeignet und nähern sich der Stufe praktischer Erprobung. Das sind die Methoden der Zentrifugierung und der Diffusion durch poröse Wände. Andere Methoden sind in Untersuchung oder müssen noch untersucht werden, und es mag sein, daß ihre Schlußresultate sie als überlegen erweisen, aber im jetzigen Moment sind sie von der Stufe der technischen Ausarbeitung noch weiter entfernt.

«c) *Die für Erzeugung der Spaltungsbomben benötigte Zeit.* Gegenwärtig kann man nur eine ganz rohe Schätzung der Zeit, die für die Entwicklung, die technische Durcharbeitung und die Erzeugung der Spaltungsbomben nötig sein wird, vornehmen.

«Immerhin kann man erwarten, vorausgesetzt daß jede mögliche Anstrengung auf die Verwirklichung des Programms verwendet wird, daß Spaltungsbomben in beträchtlichen Quantitäten innerhalb von drei oder vier Jahren zur Verfügung stehen.

«4. *Rohe Schätzung der Kosten.*» (Die Ziffern, die in dem Academy-Bericht unter diesem Titel gegeben wurden, stellten sich als rohe Schätzungen heraus, weil man damals die wissenschaftlichen und technischen Daten für präzisere Schätzungen nicht zur Verfügung hatte. Sie zeigen lediglich, daß die Unternehmung enorm kostspielig sein werde, aber immerhin noch im Rahmen der anderen Kriegsausgaben.)

4.50. Danach geht der Bericht dazu über, die unmittelbaren Bedürfnisse und die wünschenswerte Neuorganisation ins Auge zu fassen.

ZUSAMMENFASSUNG

4.51. Am Ende des I. Kapitels haben wir die Kenntnisse über Kernspaltung, die man bis Juni 1940 hatte, zusammengefaßt, und im II. Kapitel stellten wir die Hauptprobleme, wie sie zu dieser

Zeit bestanden, fest. Im Lichte dieser Feststellungen wollen wir jetzt den Fortschritt der 18 folgenden Monate überblicken, über den wir gerade berichtet haben. Der greifbare Fortschritt war nicht groß. Keine Kettenreaktion war vollendet worden; es gab keine beträchtlichen Mengen von U-235, die man von Uran 238 getrennt hatte; von Plutonium 239 hatte man nur winzige Mengen hergestellt; die Erzeugung großer Quantitäten von Uranmetall, schwerem Wasser, Beryllium und reinem Graphit war noch wesentlich im Zustand der Diskussion. Und doch gab es Fortschritte. Man kannte die Konstanten besser; Berechnungen waren kontrolliert und erweitert worden; Voraussagen über die Existenz und die Kerneigenschaften von Plutonium 239 waren gesichert worden. Über die technischen Probleme waren einige Studien durchgeführt, und zwar über die Ausbeute der Verfahren, die Kosten und das Zeitprogramm. Das wichtigste von allen Ergebnissen war: man wußte, daß die kritische Größe der Bombe mit größter Wahrscheinlichkeit innerhalb praktischer Grenzen liege. Alles in allem schien die Wahrscheinlichkeit, daß das Problem lösbar sei, auf jeden Fall größer als im Jahre 1940. Vielleicht war die Änderung auf psychologischem Gebiet noch wichtiger als die Änderung im Tatsächlichen. Mögen *Wigner, Szilard* und *Fermi* auch nicht noch stärker von der Möglichkeit der Atombombe überzeugt worden sein, als sie es schon vorher im Jahre 1940 waren, viele andere Leute hatten sich mit der Idee und ihren Konsequenzen vertraut gemacht. Offenbar hielten die Engländer und die Deutschen — beide im Krieg ineinander verbissen — den Plan der Mühe wert, verwirklicht zu werden. Ferner hatte sich die Psychologie der ganzen Nation verändert. Zwar stand der Angriff auf Pearl Harbor noch bevor, aber die über uns schwebende Kriegsgefahr wurde viel deutlicher als früher empfunden, und ein Aufwand an Kraft und Geld, den man noch im Jahre 1940 für ungeheuerlich gehalten hätte, wurde im Dezember 1941 als eine offensichtlich notwendige Vorsorge angesehen. Und so war es nicht überraschend, daß *Bush* und seine Mitarbeiter der Ansicht waren, die Zeit sei gekommen, das Uranprojekt energisch voranzutreiben. Zu diesem Zweck wurde eine vollständig neue Verwaltungsorganisation geschaffen, die wir im nächsten Kapitel beschreiben werden.

V. KAPITEL. GECHICHTE DER ORGANISATION 1942—1945

5.1. In Kapitel III wurde eine Übersicht über die Organisationsgeschichte der Uranarbeit bis Dezember 1941 gegeben. Kapitel IV berichtete über den wissenschaftlichen Fortschritt bis zu demselben Datum. Das vorliegende Kapitel beschreibt die Verwaltungsreorganisation, die im Dezember 1941 erfolgte, und verschiedene Änderungen, die sich später anschlossen.

Reorganisation der NDRC-Uraniumsektion Übertragung auf das OSRD[1]

5.2. Zwei wichtige Entscheidungen waren für die weitere Planung des Uran- oder Atombombenprogramms erforderlich. Diese Entscheidungen wurden getroffen von *Vannevar Bush,* Direktor des Office of Scientific Research and Development (das das NDRC einschloß), nach Besprechungen mit verschiedenen sich damit befassenden Gelehrten und Verwaltungspersönlichkeiten (s. III. Kap.). Die Entscheidungen waren: erstens, daß die Chance, Atombomben für den gegenwärtigen Krieg zu erhalten, groß genug sei, um einen «Volleinsatz» ('all out' effort) zu rechtfertigen; zweitens, daß die gegenwärtige Organisation, die NDRC-Uraniumsektion (bekannt als Sektion S-1 und bestehend aus *L. J. Briggs* als Vorsitzendem; *G. B. Pegram,* Vizepräsident; *H. T. Wensel,* technischem Beirat; *S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon, R. Gunn, H. D. Smyth* und *H. C. Urey),* für eine solche gewaltige Anstrengung sich organisationsmäßig nicht gut eigne.

5.3. Auf einer Zusammenkunft des NDRC vom 28. November 1941 legte Dr. *Bush* dar, warum er das Gefühl habe, es sei wünschenswert, das Uranprogramm aus dem Arbeitsbereich des NDRC herauszunehmen. Die Mitglieder des NDRC waren mit dieser Übertragung einverstanden. In Übereinstimmung damit hatte das NDRC als Organisation fernerhin keine Verbindung mehr mit dem Uranprogramm, das darauf einige Zeit lang von

[1] *Office of Scientific Research and Development.*

dem OSRD direkt verwaltet wurde — und zwar durch eine OSRD-S-1-Sektion und später durch ein OSRD-S-1-Exekutivkomitee.

5.4. An einer Konferenz der S-1-Sektion und des OSRD vom 6. Dezember 1941 kündigte *J. B. Conant,* der an Stelle von *Bush* sprach, den in Aussicht genommenen Volleinsatz und zugleich die Reorganisation der Gruppe an. Die S-1-Sektion selbst war über die vorgeschlagene Reorganisation nicht formell konsultiert worden, es besteht jedoch kein Zweifel darüber, daß die meisten ihrer Mitglieder die neuen Vorschläge durchaus befürworteten. Der Mitgliederbestand der reorganisierten S-1-Sektion war der folgende: *J. B. Conant,* Stellvertreter von *V. Bush; L. J. Briggs,* Präsident; *G. B. Pegram,* Vizepräsident; *A. H. Compton,* Programmchef; *E. O. Lawrence,* Programmchef; *H. C. Urey,* Programmchef; *E. V. Murphree,* Vorsitzender des getrennt organisierten Planungsausschusses; *H. T. Wensel,* technischer Beirat; *S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth.*

Bildung des Planungsausschusses

5.5. Gleichzeitig mit der Organisation des S-1-Ausschusses bestellte *Bush* einen Planungsausschuß, dem die Verantwortlichkeit für die technischen und ingenieurmäßigen Aufgaben, die Materialbeschaffung, die Konstruktion von Versuchsanlagen und Vollproduktionsanlagen anvertraut war. Dieser Planungsausschuß bestand aus *E. V. Murphree* (Vorsitzender), *W. K. Lewis, L. W. Chubb, G. O. Curme,* jr., und *P. C. Keith.*

Funktionen des Planungsausschusses und der OSRD-S-1-Sektion

5.6. Man richtete es so ein, daß Kontrakte, die den wissenschaftlichen Teil des Unternehmens betrafen, nicht mehr durch die ganze S-1-Sektion, sondern nur noch durch *Briggs* und *Conant,* nach Besprechung mit den beteiligten Programmchefs, an die Adresse von *Bush* geleitet werden sollten, und daß analog die Kontrakte für die technischen Aufgaben durch den Planungsausschuß an *Bushs* Adresse gehen sollten. (Die zugunsten der alten Uraniumsektion abgeschlossenen Kontrakte waren von dem

NDRC verwaltet worden.) Kontrakte für die Entwicklung der Isotopentrennung mit Hilfe von Diffusion und Zentrifuge sollten vom Planungsausschuß empfohlen werden, der ebenso für das Produktionsprogramm von schwerem Wasser die Verantwortung übernahm. *Bush* bestimmte, daß der Planungsausschuß «verantwortlich sei, darüber zu wachen, daß das schrittweise Vorgehen planvoll und so rasch wie möglich erfolge».

5.7. Somit wurden die wissenschaftlichen Gesichtspunkte bei dem Unternehmen von der Versorgung und den ingenieurmäßigen Teilen abgetrennt. Den Programmchefs — *H. C. Urey, E. O. Lawrence* und *A. H. Compton* — war die Sorge für die wissenschaftlichen Aufgaben übertragen. Anfangs bestand der Vorschlag, daß *Urey* die Trennung der Isotopen durch Diffusions- und Zentrifugalmethoden und die Forschung über die Erzeugung von schwerem Wasser übernehmen sollte. *Lawrence* war beauftragt, mit den Anfangsproduktionen kleiner Mengen spaltbarer Elemente, mit der Gewinnung größerer Mengen durch elektromagnetische Trennung und mit gewissen Versuchen über die Eigenschaften des Plutoniumkerns. *Compton* hatte die fundamentalen physikalischen Untersuchungen über die Kettenreaktion und Messung der Kerneigenschaften zu übernehmen mit besonderer Berücksichtigung der explosiven Kettenreaktion. Im Hintergrund dieses seines Auftrages stand seine Berechtigung, auch die Möglichkeit zu erforschen, ob Plutonium in nützlichen Mengen erzeugt werden könne, und zwar mit Hilfe einer regulierten Kettenreaktionsmethode. Es bestand Einverständnis darüber, daß wenigstens dieser Teil seiner Verantwortlichkeit in späteren Konferenzen genauer bestimmt werden sollte. (Die schriftlichen Berichte dieser Periode enthalten nicht immer adäquate Angaben über die Absichten. Mit Rücksicht auf die Sicherheitsbedürfnisse wurden manchmal sogar Angaben über die Wichtigkeit des Plutoniums und sogar über die Atombombe selbst vollständig weggelassen.)

5.8. Die beabsichtigte Wirkung der Reorganisation bestand darin, die Leitung des ganzen Projektes in die Hände einer kleinen Gruppe zu legen, die aus *Bush, Conant, Briggs, Compton, Lawrence* und *Murphree* bestand. Theoretisch waren *Compton, Lawrence, Urey* und *Murphree* nur für ihr Teilprogramm ver-

antwortlich. Jeder traf mit *Conant* und *Briggs* oder gelegentlich mit *Bush* zusammen zwecks Diskussion seiner eigenen Probleme oder sogar des gesamten Programms.

Sitzung der obersten Planungsgruppe Billigung der Reorganisation

5.9. Eine Zusammenkunft der obersten Planungsgruppe, bestehend aus Vizepräsident *Henry A. Wallace,* Kriegsminister *Henry L. Stimson* und Dr. *V. Bush,* fand am 16. Dezember 1941 statt. General *George C. Marshall* und Dr. *J. B. Conant,* die gleichfalls Mitglieder der Gruppe waren, nahmen nicht teil; dagegen wohnte *H. L. Smyth* aus dem Budget Bureau bei. *Bush* beschrieb die Reorganisation, die im Gange war, und seine Pläne wurden gebilligt. In einem Memorandum an *Conant* über diese Tagung schrieb *Bush:* «Man hatte innerhalb der ganzen Gruppe das bestimmte Gefühl, daß das OSRD so stark wie möglich sowohl auf die Klärung der physikalischen Grundlagen als auch auf die Förderung der technischen Pläne drängen sollte, insbesondere auf die Errichtung von Versuchsanlagen.» *Bush* schätzte die Kosten hierfür auf 4—5 Millionen Dollar und stellte fest, daß die Armee einspringen sollte, wenn die Errichtung der Anlage für volle Erzeugung begänne, mutmaßlich also, wenn die Versuchsanlagen fertig seien. Er schlug vor, daß ein technisch ausgebildeter Armeeoffizier beigeordnet werde, um sich mit der allgemeinen Natur des Uranprojektes vertraut zu machen. Man stellte auf der Tagung klar, daß die mit dem Problem verknüpften internationalen Beziehungen in der Hand des Präsidenten liegen sollten, wobei *Bush* nur verantwortlich sei für die Verbindungen innerhalb der technischen Aufgaben.

Sitzung der OSRD-S-1-Sektion vom 18. Dezember 1941

5.10. Am 18. Dezember 1941 fand eine Konferenz der reorganisierten S-1-Sektion statt. *Conant* nahm daran teil und erörterte die neu eingeschlagene Taktik, die den Volleinsatz erfordere. Er betonte, daß eine solche Anstrengung schon durch den militärischen Wert der Atombomben gerechtfertigt sei und daß die gesamte Aufmerksamkeit auf die Entwicklung dieser

Bomben konzentriert werden müsse. Das ganze Meeting fand in einer Atmosphäre von Enthusiasmus und im Bewußtsein der Dringlichkeit der Sache statt. Mehrere Methoden für elektromagnetische Trennung wurden vorgeschlagen und diskutiert und eine Anzahl von neuen Kontrakten in Vorschlag gebracht.

Sitzung der OSRD-S-1-Sektion vom 16. Januar 1942

5.11. Eine weitere Sitzung der OSRD-S-1-Sektion fand am 16. Januar 1942 statt. Man diskutierte zwanglos über die verschiedenen Produktionsmethoden, und es wurden Schätzungen darüber angestellt, bis zu welcher Zeit jede Methode Resultate erzielen könne. In Wirklichkeit waren diese Vorschläge nichts weiter als Vermutungen, denn damals waren die zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Informationen sehr unvollständig, und die Frage der Anwendbarkeit solcher Daten, die für die Konstruktion und den Betrieb einer Produktionsanlage vorlagen, war kaum angeschnitten worden.

Umgruppierung der Forschungsarbeit zu Beginn 1942

5.12. Mitte Januar 1942 entschloß sich *Compton,* die Arbeiten, für die er verantwortlich war, an der Universität von Chicago zu konzentrieren. Die Columbiagruppe unter *Fermi,* ihr gesamtes Material und ihre Ausrüstung, sowie die Princetongruppe, die die Resonanzabsorption studiert hatte, wurden im Laufe des Frühjahrs nach Chicago übergeführt. Nur gewisse kleine Gruppen blieben unter Comptons Direktion anderswo tätig. An der Universität von Californien in Berkeley wurden unter *Lawrence* die Untersuchungen über elektromagnetische Isotopentrennung großen Maßstabes beschleunigt, und ein angeschlossenes Trennungsprojekt wurde in Princeton gestartet. Unter *Urey* wurden die Forschung und Entwicklung des Diffusionsprozesses und der Erzeugung von schwerem Wasser an der Columbia-Universität fortgesetzt; dasselbe geschah mit der Zentrifugalmethode unter der allgemeinen Oberleitung von *Murphree* an der Universität von Virginia unter *Beams,* während die Zentrifugaluntersuchungen der Columbia-Universität in die Laboratorien der Standard Oil Development Co. nach Baway, New Jersey, verlegt wurden.

Bushs Bericht an den Präsidenten vom 9. März 1942

5.13. In einem Bericht, datiert vom 20. Februar 1942, empfahl *Conant,* daß alle Teile des Unternehmens spätestens bis zum 1. Juli 1942 in Gang gesetzt sein sollten. Ebenso sandte Dr. *Bush* am 9. März 1942 einen Bericht an den Präsidenten, der den allgemeinen Optimismus widerspiegelte, aber zugleich den vorläufigen Charakter der Schlußfolgerungen betonte. Der Bericht hielt eine Vollendung des Projektes im Jahre 1944 für möglich. Außerdem enthielt er den Vorschlag, daß man im Laufe des Sommers 1942 für die Konstruktion einer Vollerzeugungsanlage die Armee heranziehen müsse.

Sichtung des Programms durch Conant

5.14. Das ganze Arbeitsprogramm über schweres Wasser wurde im März und April 1942 revidiert. Die Revision erfolgte im Anschluß an einen Besuch, den *F. Simon, H. Halban* und *W. A. Akers* aus Englang im Februar und März 1942 den Vereinigten Staaten abstatteten. In einem Memorandum vom 1. April 1942, das an *Bush* gerichtet war, überprüfte *Conant* die Situation und berichtete darüber auf Konferenzen mit *Compton* und *Briggs.* Sein Bericht legte dar, daß man außerordentlich große Mengen schweres Wasser benötigen würde, wenn man bei einer Plutonium-Erzeugungsanlage schweres Wasser an Stelle von Graphit als Bremsstoff benutzen wolle. Aus diesem Grund erhob er Einspruch gegen den Vorschlag, *Halban* zu bitten, die 165 Liter schweres Wasser, die man in England hatte, nach Amerika zu bringen.

5.15. In einem Memorandum an *Bush* vom 14. Mai 1942 (kurz vor einer vorgeschlagenen Zusammenkunft der Programmchefs) schätzte *Conant,* daß es fünf Trenn- oder Produktionsmethoden gebe, die ungefähr gleiche Erfolgswahrscheinlichkeit besäßen: die Zentrifugalmethode, die Diffusionsmethode und die elektromagnetische Methode für U-235-Abtrennung; die Uranium-Graphit-Einheit und die Uranium-schweres-Wasser-Einheit zur Plutoniumerzeugung. Man hielt alle für genügend ausgearbeitet für den Aufbau von Versuchsanlagen und vielleicht sogar für einen vorläufigen Plan von Produktionsstätten. Wenn die

Methoden fabrikreif gemacht werden sollten, brauche man 500 Millionen Dollar. Zwar war es noch zu früh, die relativen Vorteile der verschiedenen Methoden exakt abzuschätzen; aber man nahm an, daß einige Methoden sich als schneller und wirksamer als andere erweisen würden. Immerhin fürchtete man, daß die Ausscheidung einer der Methoden eine ernsthafte Verzögerung zur Folge haben könnte; und man vermutete, daß die Deutschen mit ähnlichen Programmen einen gewissen Vorsprung gegenüber den Vereinigten Staaten hätten.

5.16. *Conant* hob eine Frage hervor, die für die Entwicklung des Uranprojektes durchaus entscheidend war. Diese Frage lautete, ob Atombomben Entscheidungswaffen oder eher Ergänzungswaffen bedeuteten. Wenn sie Entscheidungswaffen waren, dann gab es grundsätzlich keine Grenze für den Aufwand an Arbeit und Geld, den man hineinstecken sollte. Aber kein Mensch wußte, wie wirksam die Atombomben sein würden.

Übergang von der OSRD-S-1-Sektion zum OSRD-S-1-Exekutivkomitee

5.17. Im Mai 1942 schlug *Conant Bush* vor, man solle, statt die einzelnen Mitglieder der Sektion zu ermutigen, ihre eigenen Forschungsgebiete mit *Conant* und *Briggs* zu diskutieren, die OSRD-S-1-Sektion zu einer Zusammenkunft zwecks allgemeiner Diskussion des ganzen Programms veranlassen. *Bush* ging darauf in der Weise ein, daß er die OSRD-S-1-Sektion auflöste und sie durch das OSRD-S-1-Exekutivkomitee ersetzte, das sich aus den folgenden Mitgliedern zusammensetzte: *J. B. Conant,* Vorsitzender; *L. J. Briggs, A. H. Compton, E. O. Lawrence, E. V. Murphree, H. C. Urey. H. T. Wensel* und *I. Stewart* wurden außerdem gewählt, um als technische Unterstützung und als Sekretäre dem Komitee anzugehören.

5.18. Die folgenden Mitglieder der alten OSRD-S-1-Sektion wurden beratend dem neuen Komitee beigegeben: *S. K. Allison, J. W. Beams, G. Breit, E. U. Condon, H. D. Smyth.*

5.19. Die Funktionen des neuen OSRD-S-1-Exekutivkomitees waren, a) Bericht zu erstatten über Programm und Budget für die nächsten 18 Monate, und zwar für jede einzelne Methode;

b) Vorschläge vorzubereiten, wieviele Programme fortgeführt werden sollten; c) Vorschläge vorzubereiten über die Teile des Programms, die man ausscheiden könne.

5.20. Die Empfehlungen, die Gegenstände der OSRD-S-1-Taktik betrafen, und solche, die sich auf den Abschluß von OSRD-S-1-Kontrakten bezogen, wurden durch Mehrheitsbeschluß des Komitees herbeigeführt. *Conant* selbst enthielt sich der Abstimmung, ausgenommen im Falle eines Stichentscheids. Obwohl *Bush* allein autorisiert war, die OSRD-Politik zu bestimmen und die OSRD-Fonds zu überweisen, befolgte er doch gewöhnlich die Empfehlungen des S-1-Exekutivkomitees.

Bericht von Bush und Conant an den Präsidenten vom 17. Juni 1942

5.21. Am 13. Juni 1942 sandten *Bush* und *Conant* an Vizepräsident *Henry A. Wallace,* den Kriegsminister *Henry L. Stimson* und den Generalstabschef *George C. Marshall* einen Bericht mit Vorschlägen von Detailplänen zur Fortsetzung und Ausdehnung des Atombombenprogramms. Alle drei stimmten dem Bericht zu. Am 17. Juni 1942 wurde der Bericht von *Bush* dem Präsidenten zugesandt, der gleichfalls zustimmte. Der Bericht, der zu lang ist, um ihn in seinem vollen Umfang wiederzugeben, enthielt vier Hauptteile, die folgende Fragen behandelten: a) Stand der Entwicklung nach Schätzungen der führenden Gelehrten (senior scientists), b) Vorschläge der Programmchefs und des Planungsausschusses, c) Bemerkungen von *Bush, Conant* und Generalmajor *W. D. Styrer,* d) Vorschläge von *Bush* und *Conant.* Wir können die Teile a) und c) folgendermaßen darlegen:

a) *Der gegenwärtige Stand des Programms.* 1. Es war klar, daß ein Quantum von U-235 oder von Plutonium in Höhe von einigen kg explosiv sein werde, daß eine solche Explosion gleichwertig sei mit der von einigen tausend Tonnen TNT, und daß man eine solche Explosion in einem gewollten Augenblick herbeiführen könne. 2. Es war klar, daß es vier Methoden gab, das spaltbare Material herzustellen, und daß alle diese Methoden realisierbar erschienen; doch war eine definitive Entscheidung hinsichtlich der Überlegenheit einer Methode über die anderen noch nicht

möglich. 3. Es war ferner klar, daß Erzeugungsanlagen beträchtlicher Größe entworfen und gebaut werden konnten. 4. Es schien wahrscheinlich, daß bei Bewilligung entsprechender Fonds und Prioritätsrechte eine Vollproduktion früh genug gestartet werden könne, um militärische Bedeutung zu haben.

c) *Bemerkungen von Bush, Conant und General Styer.* Einige Vorschläge waren von *Lawrence, Urey, Compton* und *Murphree* gemacht worden. Diese Empfehlungen waren überprüft worden von *Bush, Conant* und General *Styer* (der von General *Marshall* mit der Verfolgung der Programmfortschritte betraut worden war), und ihre Kommentare zu den Programmen bestanden in folgendem: 1. Wenn *vier* verschiedene Methoden von einer Gruppe kompetenter Wissenschaftler für anwendbar gehalten wurden, so schien es sicher, daß auch der Feind ein solches Endresultat erreichen könne, vorausgesetzt, daß er genug Zeit habe. 2. Offenbar konnte das vorgeschlagene Programm nicht mit größter Geschwindigkeit durchgeführt werden, ohne mit anderen wichtigen Aufgaben in Konflikt zu geraten, sowohl was das wissenschaftliche Personal als auch das entscheidende Material betraf. Hier mußte eine Wahl getroffen werden zwischen dem erreichbar erscheinenden militärischen Resultat und der sicheren Kollision mit anderen Kriegsbestrebungen. 3. Mit Rücksicht auf den Piniercharakter der ganzen Bemühungen war es zu der damaligen Zeit gefährlich, sich ausschließlich auf *ein* Mittel für den Erfolg zu konzentrieren. 4. Deshalb schien es am besten, einmal mit denjenigen Teilen des Programms weiterzukommen, die am wenigsten mit anderen wichtigen Kriegsunternehmungen kollidierten. Die übrigen Teile des Programms konnten nach Regelung dieser Kollisionsfragen weitergehen.

5.22. Der Bericht vom 13. Juni 1942 an den Präsidenten und *Bushs* Begleitbrief vom 17. Juni 1942 wurden mit der handschriftlichen Billigung des Präsidenten an *Bush* zurückgeschickt. Eine Abschrift des Berichtes sandte *Bush* an General *Styer* am 18. Juni 1942.

Wahl von Oberst J. C. Marshall

5.23. Am 18. Juni 1942 wurde Oberst *J. C. Marshall* aus dem Ingenieurkorps vom Chefingenieur mit der Bildung einer neuen

Abteilung im Ingenieurkorps beauftragt, die die ihr zugewiesenen Spezialaufgaben (Atombomben) weiterführen sollte. Diese Abteilung erhielt die Bezeichnung «*Manhattan District*»[1] und wurde offiziell am 13. August 1942 errichtet. Ihre Aufgabe war aus Sicherheitsgründen mit dem Decknamen «DSM Projekt» (Development of Substitute Materials = Entwicklung von Ersatz-Material) etikettiert.

Wahl von General L. R. Groves

5.24. Am 17. September 1942 übertrug der Kriegsminister dem Brigadegeneral des Ingenieurkorps *L. R. Groves* die volle Verantwortung für die gesamte Tätigkeit der Armee im Zusammenhang mit dem DSM-Projekt.

Das militärische Planungskomitee Arbeitsweise der OSRD-Komitees[2]

5.25. Am 23. September 1942 fand eine Konferenz zwischen den vom Präsidenten zur Bestimmung der allgemeinen Richtlinien für das Projekt bezeichneten Personen und einigen anderen statt. Anwesend waren Kriegsminister *Henry L. Stimson,* Generalstabschef General *George C. Marshall,* Dr. *J. B. Conant,* Dr. *V. Bush,* Generalmajor *Brehon Somervell*, Generalmajor *W. D. Styer* und Brigadegeneral *L. R. Groves.* (Vizepräsident *Henry A. Wallace* war verhindert.) Es wurde ein militärisches Planungskomitee eingesetzt, bestehend aus Dr. *Bush* als Vorsitzendem mit *J. B. Conant* als Vertreter, Generalmajor *W. D. Styer* und Konteradmiral *W. R. Purnell.* General Groves war beauftragt, den Sitzungen beizuwohnen und als Exekutivoffizier die Planungen durchzuführen. Die Aufgaben dieses Komitees waren Aufstellung der militärischen Richtlinien betr. Material, Forschung, Entwicklung, Produktion, Strategie, Taktik und Unterbreitung von Berichten über die Fortschritte an die Planungsgruppe, die der Präsident ernannt hatte.

---

[1] Mit diesem Decknamen ist von da an in USA die ganze Unternehmung bis auf den heutigen Tag bezeichnet worden.

[2] Vergleiche 5.2.

5.26. Die Einsetzung des Military Policy Committee wurde von dem Joint New Weapons Committee gebilligt, welches von den US-Verbindungs-Stabschefs (U. S. Joint Chiefs of Staff) ernannt worden war und aus Dr. *V. Bush,* Konteradmiral *W. R. Purnell* und Brigadegeneral *R. C. Moses* bestand.

5.27. Die Schöpfung des Military Policy Committee brachte tatsächlich alle Phasen des DSM-Projektes unter die Kontrolle von Dr. *Bush,* Dr. *Conant,* General *Styer,* Admiral *Purnell* und General *Groves.*

5.28. Das OSRD-S-1-Exekutivkomitee hielt von Juni 1942 bis Mai 1943 ungefähr monatlich eine Sitzung ab und trat im September 1943 nochmals zusammen. Vom September 1942 an wohnten General *Groves* und Oberst *Marshall* den Sitzungen meist bei, ferner häufig Vertreter der Industrien, die sich mit Produktionsanlagen befaßten. Die Empfehlungen des Komitees waren nicht bindend, wurden aber meist befolgt. So diente es als beratende Körperschaft für Dr. *Bush* und General *Groves* und als erste Verbindungsgruppe zwischen Wissenschaft, Industrie und Militär im DMS-Projekt. Das OSRD-S-1-Exekutivkomitee wurde nie förmlich aufgelöst, doch stellte es seine Tätigkeit im Herbst 1943 ein.

5.29. Die Beschaffungs- und Ingenieurfunktionen des Planungsausschusses wurden vom Manhattan-Distrikt im September 1942 übernommen, und der Planungsausschuß gab damit seine Tätigkeit auf.

5.30. Im Frühjahr 1943 war man der Meinung, daß der Manhattan-Distrikt in der Lage sei, die Forschungs- und Entwicklungskontrakte vom OSRD zu übernehmen. Diese Übernahme geschah am 1. Mai 1943 und bedeutete die Beendigung der formalen Verbindung des OSRD mit dem Uranprojekt.

5.31. Im Juli 1943 wurden *Conant* und *R. C. Tolman* offiziell gebeten, als wissenschaftliche Berater des General *Groves* tätig zu sein. Sie hatten dies bisher inoffiziell schon getan und setzten das nun fort. Man vollendete die Koordination der verschiedenen wissenschaftlichen und technischen Programme durch Zusammenkünfte zwischen General *Groves* und den Leitern der verschiedenen Projekte, insbesondere *Compton, Lawrence, Oppenheimer* (vergleiche Kapitel XII) und *Urey.*

Die spätere Organisation: der Manhattan-Distrikt

5.32. Von 1943 an gab es keine wichtigen Änderungen mehr in der Organisationsform und wenig bedeutende innerhalb des beteiligten Personals. General *Groves* behielt die Hauptverantwortung, alle Anstrengungen zu koordinieren und auf die militärischen Aufgaben auszurichten. Er hatte die Pflicht, die einzelnen Teile des Projektes im Schritt zu halten, zuzusehen, daß die Rohmaterialien für die verschiedenen Anlagen zur Verfügung standen, die Produktionslisten aufzustellen, zu gewährleisten, daß die Entwicklung des Bombenentwurfs mit den Produktionslisten Schritt halte, die Vorbereitungen für die Benutzung der Bomben zu treffen, wenn es soweit sei, und ein passendes Sicherheitssystem aufrechtzuerhalten. Zu seiner Entlastung stand General *Groves* die Hilfe seiner gewaltigen Organisation aus Zivilgelehrten, Ingenieuren, Ingenieuroffizieren und angeworbenen Leuten zur Verfügung. Eine Reihe von Zivilisten wurden bereits erwähnt oder werden es noch in späteren Kapiteln, die von deren speziellen Aufgaben handeln. Der Brigadegeneral *T. F. Farrell* wirkte als *Groves'* Beauftragter in den wichtigen späteren Phasen des Projektes. Oberst *K. D. Nichols*, Distriktsingenieur des «Manhattan-Distrikts» mit seinen Hauptquartieren in den Clinton-Ingenieur-Werken, wurde ab 1942 mit dem Projekt in Verbindung gebracht. Er befaßte sich mit dem Forschungs- und Produktionsproblem von U-235 und von Plutonium und zeigte hierbei allzeit außergewöhnliches Verständnis für technische Probleme und ihre relative Wichtigkeit. Zwei andere Offiziere sind zu erwähnen, Oberst *F. T. Matthias* und Oberst *S. L. Warren*. Oberst *Matthias* hat verantwortungsvolle Aufgaben in den Hanford-Ingenieur-Werken außerordentlich gut durchgeführt; seine Aufgabe bestand in Konstruktions- und Ausführungsarbeiten des Projekts. Oberst *Warren* ist Chef der medizinischen Abteilung des Manhattan-Distrikts und trug somit die letzte Verantwortung für gesundheitliche Fragen in allen Teilen des Projektes.

Zusammenfassung

5.33. Ende 1941 wurde eine ausgedehnte Revision der ganzen Uraniumsituation durchgeführt. Als Ergebnis der Revision ent-

schlossen sich *Bush* und seine Ratgeber, die Anstrengungen im Uraniumprojekt zu steigern und die Organisation zu ändern. Präsident Roosevelt stimmte dieser Entscheidung zu. Von Januar 1942 bis Frühsommer 1942 wurde das Uraniumunternehmen von *Bush* und *Conant* gemeinschaftlich mit den Programmchefs und einem Planungsausschuß geleitet. Im Sommer 1942 übernahm die Armee durch das Ingenieurkorps einen aktiven Anteil an der Materialbeschaffungs- und der Ingenieurarbeit, indem sie den «Manhattan-Distrikt» zu diesem Zweck organisierte. Im September 1942 wurden Dr. *Bush,* Dr. *Conant,* General *Styer* und Admiral *Purnell* als Military Policy Committee eingesetzt, um die allgemeinen Richtlinien des ganzen Projektes zu bestimmen. Ebenfalls im September wurde General *Groves* bestellt, um die ganze Tätigkeit der Armee bei diesem Projekt zu überwachen. Die Periode gemeinschaftlicher Verwaltung durch OSRD und Armee dauerte bis zum April 1943, wobei die Rolle der Armee in dem Maße wuchs, als die industrielle Tätigkeit voll in Gang kam. Im Mai 1943 gingen die Forschungskontrakte an das Ingenieurkorps über; die Periode gemeinsamer Leitung von OSRD und Armee endete, und die Periode der vollständigen Leitung durch die Armee begann.

5.34. Vom ersten Anfang an hatte Präsident *Roosevelt* das Projekt aufmerksam verfolgt und bis zu seinem Tode unablässig studiert und das ganze große Problem des Military Policy Committee gebilligt. Präsident *Truman,* der als US-Senator über das Projekt und seine Bedeutung unterrichtet war, erhielt durch den Kriegsminister und durch General *Groves* bei einer Konferenz im Weißen Hause nach seinem Amtsantritt eine vollständige und auf den neuesten Stand gebrachte Darstellung. Daraufhin gab der Präsident dem Programm seine volle Unterstützung und blieb in ständigem Kontakt mit dessen Fortschritten.

VI. KAPITEL. DAS «METALLURGISCHE PROJEKT» IN CHICAGO 1942

EINLEITUNG

6.1. In Kap. IV und V wurde dargelegt, daß die bis Ende 1941 gesammelten Informationen über die Möglichkeit der Erzeugung einer Atombombe dergestalt waren, daß die Ausdehnung des Unternehmens gerechtfertigt erschien. Diese Ausdehnung verlangte eine Reorganisation der Verwaltung. Man nahm allgemein an, es sei sehr wahrscheinlich, daß eine Atombombe von enormer Zerstörungskraft hergestellt werden könne, und zwar entweder aus konzentriertem U-235 oder aus dem neuen Element Pu. Man schlug deshalb vor, ein intensives experimentelles und theoretisches Programm aufzustellen, das sowohl die Isotopentrennung wie die Kettenreaktionsprobleme umfaßte. Dieses Programm sollte, wie man hoffte, definitiv ergeben, ob U-235 vom U-238 in beträchtlichen Mengen abgetrennt werden könne oder nicht, sei es mit elektromagnetischen oder statistischen Methoden; ferner, ob eine Kettenreaktion mit natürlichem U oder dessen Verbindungen sichergestellt werden könne oder nicht und (wenn ja), ob sie zu relativ reichlicher Ausbeute von Pu führe; endlich, ob so erzeugtes Pu vom Mutter-Element U getrennt werden könne. Es bestand ferner die Hoffnung, daß dieses Programm die theoretischen und experimentellen Ergebnisse liefere, die für den Entwurf einer Kettenreaktionsbombe mit schnellen Neutronen nötig sind.

6.2. Wie in Kap. V dargelegt, waren die Probleme der Isotopen-Trennung den Gruppen unter Lawrence und Urey anvertraut worden, während die übrigen der Comptongruppe übergeben waren, die an der Universität von Chicago unter dem Decknamen «Metallurgical Laboratory» (M. L.) organisiert wurde. In diesem und den beiden folgenden Kapiteln werden wir die Arbeit des M. L. und der damit verbundenen Laboratorien darstellen bis zum Juni 1945. In späteren Kapiteln werden wir die

Trennungsarbeit und die Arbeit der Gruppe «Entwicklung der Bombe» schildern, die früh im Jahre 1943 von dem M. L. getrennt wurde.

6.3. Es wäre nutzlos, zu versuchen, die relative Wichtigkeit der Beiträge der verschiedenen Laboratorien zum Vollerfolg des Atombomben-Projekts abzuschätzen. Dieser Bericht versucht das nicht, und es bestehen wenig Beziehungen zwischen dem Raum, der in diesem Buch einer Gruppe gewidmet wird, und ihrer Fähigkeit oder Wichtigkeit. Bei der Entscheidung, welche Unterabteilung des A. B. P. (Atombombenprojekt) zuerst und am ausführlichsten besprochen werden sollte, haben wir uns durch die Kriterien des allgemeinen Interesses und der militärischen Sicherheit leiten lassen. Einige technisch sehr wichtige Entwicklungen haben geringes allgemeines Interesse, andere, die sowohl interessant wie auch wichtig sind, müssen noch geheim gehalten werden. Wenn man diese Kriterien auf die Ziele und Leistungen der verschiedenen Laboratorien anwendet, die mit Beginn der Untersuchung auf breiterer Basis eingerichtet wurden, so erscheint das M. L. als der Teil des Projektes, der am vollständigsten behandelt werden kann.

ZIELE DES «M. L.»

6.4. In Übereinstimmung mit den gerade dargelegten allgemeinen Aufgaben waren die Anfangsziele des «M. L.»: 1. Ein System mit normalem U zu finden, das eine Kettenreaktion zuläßt. 2. Wenn sich eine solche Kernreaktion findet, zu zeigen, daß sich Pu chemisch von andern Materialien trennen läßt. Schließlich die theoretischen und experimentellen Daten zu gewinnen, um eine explosive Kernreaktion mit U-235 oder Pu zustande zu bringen. Das letzte Ziel des M. L. war, die Pläne für eine Großproduktion von Pu und seinen Gebrauch zu Bomben vorzubereiten.

ORGANISATION DER ARBEIT

6.5. Das «Laboratorium» hatte sich nicht nur mit seinen nächstliegenden Zielen zu befassen, sondern zugleich die späteren Ziele im Auge zu behalten und sich ihnen zu nähern in der Annahme, daß die unmittelbaren Ziele erreicht würden. Es konnte

den Abschluß der «Kettenreaktion» nicht abwarten, um dann die Chemie des Pu zu studieren. Es mußte voraussetzen, daß Pu abgetrennt werden könne, und mit der Planung für seine Erzeugung und seinen Gebrauch voranmachen. Folglich wurden die Probleme immer neu bestimmt, wenn neue Informationen zur Verfügung standen, und das Versuchsprogramm wurde meist von Woche zu Woche neu abgestimmt. Allgemein gesagt, befaßte sich die Kernphysik-Gruppe unter *E. Fermi* vor allem mit der Erreichung einer funktionierenden Kettenreaktion, die chemische Gruppe von *F. H. Spedding* (später abwechselnd unter *S. K. Allison, J. Franck, W. C. Johnson* und *T. Hogness*) mit der Pu-Chemie und den Separationsmethoden, und die theoretische Gruppe unter *E. Wigner* mit dem Entwurf der Produktionseinheiten[1]. Die Probleme waren immerhin miteinander verflochten und die verschiedenen wissenschaftlichen und technischen Aspekte des Spaltprozesses wurden stets in der Gruppe studiert, die für die spezielle Aufgabe am besten ausgerüstet war. Im März 1942 trat *Th. Moore* an die Spitze der Ingenieur-Gruppe. Andere leitende Männer in der Gruppe waren *M. C. Leverett, J. A. Wheeler* und *C. M. Cooper,* der später Moores Nachfolger als Leiter der technischen Gruppe wurde. Im Sommer 1942 erwies sich die Wichtigkeit des Gesundheitsproblems, und eine Gesundheitsabteilung wurde unter Dr. *R. S. Stone* organisiert. Die schwierige Aufgabe der Organisation und Verwaltung eines Forschungslaboratoriums, das mit fast explosiver Heftigkeit an Größe und Komplexität wuchs, wurde von R. L. Doan als Laboratoriumsdirektor durchgeführt.

6.6. Wir ziehen es vor, das Kapitel auf die Tätigkeit von 1942 zu beschränken, weil eine sich selbst aufrechterhaltende Kettenreaktion erst am 2. Dezember dieses Jahres vollendet wurde — zu derselben Zeit, als gerade das ganze Chicago-Projekt durch ein Revisionskomitee neu überprüft wurde, dessen Mitglieder hauptsächlich mit Rücksicht auf ihre Ingenieurqualitäten ausgewählt waren.

(Fußnote des Originaltextes): Mitglieder dieses Komitees waren: *W. K. Lewis, C. H. Greenewalt, T. C. Gary* und *Roger Williams. E. V. Murphree* gehörte gleichfalls dazu, war aber zufolge Krankheit an der Teilnahme verhindert.

---

[1] production piles, vergl. Fußnote zu 4.8.

Das war ein dramatisches Zusammentreffen, und es ist außerdem für die Zwecke dieses Berichtes sehr praktisch, da beide Ereignisse als Ende einer Epoche des Metallurgical Laboratory (M. L.) betrachtet werden können. Außerdem war bei der Vorbereitung des Besuchs des Revisionskomitees ein zusammenfassender Bericht vorbereitet worden. Dieser Bericht, bekannt unter dem Namen «Durchführbarkeitsbericht» (Feasibility Report), wurde bei der Vorbereitung dieses Kapitels ausgiebig benützt.

PLAN DES KAPITELS

6.7. In diesem Kapitel geben wir den Stoff in der oben angeführten Reihenfolge der Themen. In Teil I erörtern wir die Fortschritte in den «Anfangszielen», d. i. a) Materialversorgung, b) experimenteller Nachweis der Kettenreaktion, c) Chemie des Pu und einige Trennungsprobleme, d) einige typische durchgeführte Hilfsexperimente und e) schließlich die Untersuchungen über schnelle Neutronen. Das hier im Detail Beschriebene ist unvermeidlicherweise nur ein Beispiel aus einem großen Aufwand von theoretischen und experimentellen, wirklich durchgeführten Arbeiten. In Teil II werden wir die Möglichkeiten erörtern, die für Erzeugungs-Einheiten und Separationsmethoden ins Auge gefaßt wurden, und die speziellen im November 1942 gemachten Vorschläge.

I. TEIL. FORTSCHRITTE IN RICHTUNG AUF DIE ANFANGSZIELE

MATERIALBESCHAFFUNG

VORBEMERKUNG

6.8. In den vorhergehenden Kapiteln dieses Berichtes wurde dargelegt, daß die Beschaffung von Material in genügender Reinheit ein wichtiger Teil des Problems war. Soweit U in Betracht kam, schien es wahrscheinlich, daß es in hochgradig gereinigtem metallischem Zustand oder wenigstens als hochgradig reines Oxyd benötigt werde. Die anderen benötigten Materialien waren entweder Graphit, schweres Wasser (D_2O) oder möglicherweise Beryllium. Damals war klar, daß, so verlockend auch D_2O als

Moderator war, auf Monate und Jahre hinaus keine großen Quantitäten davon zur Verfügung stehen würden. Beryllium schien weniger vorteilhaft und fast ebenso schwierig zu bekommen. Darum konzentrierte man die Bemühungen auf Graphit. Wie in Kap. V dargelegt, war die Beschaffung von U und Graphit nicht in erster Linie Sache des M. L.[1], sondern oblag *E. V. Murphree* und andern vom Planungsausschuß (planning board). Tatsächlich führte das offenbare Interesse des M. L. hiefür zu dauernden Interventionen seitens seiner Vertreter. Ein großer Anteil des Verdienstes für den schließlichen Erfolg der Materialbeschaffung gebührt N. Hilberry und später R. L. Doan, die jederzeit von A. H. Compton unterstützt wurden.

Uran-Erz

6.9. Offensichtlich wäre kein Ansatzpunkt für die Inangriffnahme des ganzen Projektes vorhanden gewesen, wenn nicht die Aussicht bestanden hätte, genug U für die Uranium-Bomben-Fabrikation zu finden. Frühe Anzeichen waren günstig und ein sorgsamer Überschlag im November 1942 zeigte, daß eine hinreichende Anzahl Tonnen Uran-Erz unmittelbar lieferbar waren.

Uranoxyd und Uranmetall

6.10. Ende 1941 existierten nur einige Gramm gutes U-Metall, von der Westinghouse Electric & Manufactures Co. und anderen auf experimenteller Basis hergestellt, und ein paar Pfund sehr unreines Feuerwerks-Pulver von der Metal Hydrides Co. Die einzige beträchtliche Menge Rohmaterial, die damals hierzulande zur Verfügung stand, war in Gestalt von handelsüblichem schwarzem Uranoxyd, das in beschränkten Quantitäten von der Canadian Radium and Uranium Co. bezogen werden konnte. Es enthielt 2—5 % Verunreinigungen und war ein Material, das einen Neutronen-Multiplikations-Faktor von nur etwa 0,87 in einem Exponentialelement ergab.

6.11. Im Mai 1942 begannen Lieferungen von durchschnittlich 15 Tonnen im Monat von schwarzem Oxyd von größerer Reinheit und größerer Einheitlichkeit einzulaufen. Die Gesamtver-

[1] Metallurgical Laboratory, siehe 6.2 und Überschrift von 6.4.

unreinigung war kleiner als 1 %, der Borgehalt betrug einige Millionstel und der Neutronen-Multiplikations-Faktor k war etwa 0,98. (Es sei daran erinnert, daß der Multiplikations-Faktor auch von der Reinheit des Graphits abhängt.) Die Lieferungen dieses Materials erreichten im September 1942 eine Tonne pro Tag.

6.12. Versuche von *J. I. Hoffmann* im National Bureau of Standards zeigten, daß durch eine Ätherextraktionsmethode alle Verunreinigungen mit Hilfe einer einzigen Extraktion von Uranyl-Nitrat entfernt werden konnten. Der Gebrauch dieser Methode beseitigte die großen Schwierigkeiten bei der Herstellung von reinem Oxyd und von reinem Ausgangsmaterial für die Herstellung des Metalls. Anfang Mai 1942 wurden Vereinbarungen mit den Mallinckrodt Chemical Works in St. Louis abgeschlossen, die reine Oxydationsstufe durch einen Äther-Extraktionsprozeß als Produktionsbasis für weitere Verringerung der Verunreinigung zu entwickeln und das Endprodukt als braunes Dioxyd zu liefern. Die Lieferungen begannen im Juli 1942 mit 30 Tonnen pro Monat. Dieses Oxyd wird jetzt als Ausgangsmaterial für die ganze Uranmetallproduktion benutzt; eine höhere handelsmäßige Reinheit kann nicht erwartet werden. Tatsächlich war es eine bemerkenswerte Leistung, eine Produktion von einer Tonne pro Tag entwickelt und verwirklicht zu haben, um grob unreines Handelsoxyd in ein Oxyd von einem Reinheitsgrad zu verwandeln, wie er sogar im Laboratorium nur selten erreicht wird.

6.13. Der von Westinghouse benutzte Prozeß, um U-Metall zu erzeugen, war die Elektrolyse von KUF_5 mit einem Kostenaufwand von etwa 1000 Dollar pro Pfund. Da KUF_5 unter der Wirkung von Sonnenlicht photochemisch hergestellt wurde, bedeutete diese Methode die Gefahr einer Produktionshemmung (eines Flaschenhalses der Produktion). Man fand, daß Uraniumtetrafluorid an Stelle von KUF_5 benutzt werden konnte, und man schritt zur Erzeugung dieses Salzes in den Harshaw Chemical Co. in Cleveland und in der du Pont-Anlage in Pouns Grove, New Jersey. Die Produktion begann im August 1942; im Oktober 1942 war sie auf 700 Pfund pro Tag in Harshaw und 300 Pfund pro Tag bei du Pont angelangt. In beiden Fällen wurde das von den Mallinckrodt-Werken gereinigte Dioxyd mit Fluorwasserstoff behandelt.

6.14. Als Resultat dieser Versorgung der Westinghouse Co. mit Rohmaterial und der Vergrößerung der Anlage konnten die Westinghouse-Lieferungen im November 1942 auf mehr als 6000 Pfund angesammelt werden, und es war zu erwarten, daß sie im Januar 1943 auf 500 Pfund pro Tag kämen. Die Reinheit des Materials war gut und die Kosten waren auf 22 Dollar per Pfund gesenkt worden.

6.15. Die Lieferungen annehmbaren Metalls seitens der Metal Hydrides Co. wurden durch verschiedene Umstände verzögert und begannen erst im November 1942. Man nahm an, daß die Erzeugung dieser Gesellschaft später 1000 Pfund pro Woche erreichen werde.

6.16. Weder der Westinghouseprozeß noch der Metal-Hydrides-Prozeß war vollständig befriedigend. Intensive Tätigkeit zur Beschleunigung der Metallproduktion, die unabhängig voneinander von *F. H. Spedding* und seinen Mitarbeitern im Iowa State College in Amas, Iowa, und von *C. J. Rodden* im National Bureau of Standards entfaltet wurde, führten zur Entwicklung einer befriedigenden Methode. Bessere Produktionsmöglichkeiten wurden im Herbst 1942 in Amas gefunden und ergaben bald — Ende November — Tagesleistungen von einer Tonne. Der Prozeß war äußerst einfach, schnell und billig.

6.17. Weitere Untersuchungen legten zusätzliche vorteilhafte Änderungen nahe, und Mitte 1943 benutzten *Spedding* in Iowa und andere Produzenten die endgültig angenommene Methode.

6.18. Ende 1942 wurden vom «Manhattan District» Anordnungen getroffen, um die Metallerzeugung zu vergrößern durch verstärkte Beanspruchung der Mallinckrodt Chemical Works, der Union Carbide and Carbone Corp. und der du Pont Co.

6.19. Zusammenfassung: Während des größeren Teiles von 1942 stand kein Metall zur Verfügung, was, wie wir sehen werden, den Fortschritt ernsthaft verzögerte. Aber gegen Ende des Jahres waren die Produktionsprobleme nahezu gelöst und zirka sechs Tonnen Metall konnten in die im November 1942 konstruierte Produktionseinheit eingebaut werden. Der «Manhattan District» übernahm Ende des Jahres die ganze Metallversorgungsaufgabe unter der Generaldirektion von Oberst *Ruhoff,* der früher in den Mallinckrodt Chemical Works tätig gewesen war. Vom

Gesichtspunkt der Metallerzeugung aus gab es keine weiteren ernsthaften Verzögerungen oder Schwierigkeiten mehr zufolge Materialknappheit.

Versorgung mit Graphit

6.20. Anfang 1942 war die Graphitproduktion noch unbefriedigend, aber sie stand unter ganz anderen Verhältnissen als die Metallproduktion, da es bereits eine große Graphitproduktion gab. Es war mehr eine Reinheits- und Prioritätsfrage. In hohem Grade durch die Bemühungen von *N. Hilberry* wurden die National Carb. Co. und die Speer Carbon Co. herangezogen. Beraten durch die Experten des National Bureau of Standards, wurden diese Gesellschaften in den Stand gesetzt, hochgereinigten Graphit zu erzeugen, dessen Neutronenabsorption einige 20 % geringer war als die des vorher benutzten Standard-Handelsmaterials. Obwohl weitere Bemühungen, die Verunreinigungen zu verringern, einigen Erfolg hatten, war das Problem im wesentlichen schon Mitte 1942 gelöst, und große Bestellungen wurden unter Mitwirkung des Kriegsproduktionsamtes gemacht. Auch diese Versorgungsaufgabe, wie diejenige mit U-Metall, wurde vom «Manhattan District» übernommen.

DIE KETTENREAKTION

Weitere Zwischen-Experimente

6.21. In der Zeit der Organisation des «Metallurgical Project» glaubten die meisten eingeweihten Physiker, daß wahrscheinlich eine Kettenreaktions-Einheit aufgebaut werden könne, wenn genügend reiner Graphit und reines U-Metall zur Verfügung stehe. Über Resonanzabsorption und über die Theorie der Absorption und Streuung von Neutronen in einer Einheit war mit Vorversuchen genügend vorgearbeitet worden, um einen Gitterbau zu entwerfen, der recht gute Aussicht hatte, eine Kettenreaktion in Gang zu halten. Nichtsdestoweniger gab es noch Unsicherheiten in Experimentaldaten und bei den theoretischen Approximationen. Es bestanden zwei Möglichkeiten: 1. eine Einheit nach dem bestmöglichen Entwurf zu bauen; 2. genauere Messungen der ein-

schlägigen Kernkonstanten zu machen, weitere Vorversuche durchzuführen und die Berechnungen zu verbessern. Es unterliegt kaum einem Zweifel, daß die erstere Alternative die größere Wahrscheinlichkeit für sich hatte, rasch zur Pu-Produktion zu kommen. Viele wichtige Fragen konnten durch eine in Gang gesetzte Einheit rascher beantwortet werden als durch eine Reihe von Einzelversuchen. Aber leider standen die nötigen Materialmengen nicht zur Verfügung, und es dauerte noch neun Monate, bis man sie erhielt. Deswegen mußte man die zweite Alternative wählen, d. h. alle wichtigen oder möglicherweise wichtigen Informationen sammeln, die man irgendwie erhalten konnte.

6.22. Die hauptsächliche Forschungstätigkeit bestand in einer Serie von Vorversuchen. Der einzelne Aufbau für jeden Vorversuch konnte benutzt werden, um die auf Hilfsexperimenten beruhenden Berechnungen zu prüfen, z. B. wurde das Verhältnis von Uran und Graphit verändert, Oxyde verschiedener Reinheit wurden benutzt, die Oxyde in Klumpen verschiedener Größe, Form und Kompression verwendet, der Gitterabstand wurde variiert, die Wirkung einer Umhüllung der Uranoxyd-Einheiten mit Beryllium und mit Paraffin ausprobiert, und schließlich wurden Einheiten von gleichem Gitter-Typus, aber verschiedener Größe verwendet, um festzustellen, ob die Werte des Multiplikations-Faktors k (für unendliche Größe) dieselben seien, wenn sie aus den Resultaten verschiedener Maßreihen berechnet wurden. Im allgemeinen waren *E. Fermi* die Untersuchungen über Wirkung von Verunreinigungen anvertraut und *S. K. Allison* die Prüfung der verschiedenen Gitter-Dimensionen. Alle diese Versuche stärkten das Vertrauen der Gruppe in den berechneten Wert von k und in die Annahme, daß eine Einheit mit k größer als 1 gebaut werden könne. Im Juli stand genug gereinigtes Uran von den Mallinckrodt-Werken zur Verfügung, um die Versuchseinheit Nr. 9 zu bauen. Wie bei den früheren Experimenten wurde eine Radium-Beryllium-Quelle am Boden der Gitterkonstruktion angebracht und die Neutronen-Dichtigkeit längs der Vertikalachse der Säule gemessen. Damals war bekannt, daß die Neutronendichte exponentiell mit der wachsenden Distanz von der Neutronenquelle abnahm (woher der für solche Versuche oft gebrauchte Name Exponentialsäule stammt) und daß auf Grund

dieses Abnahmegesetzes die Multiplikationskonstante für eine «unendliche» Säule von gleichen Gitterabmessungen berechnet werden konnte. Zum ersten Male ergab sich die experimentelle Multiplikationskonstante als größer als 1 (und zwar zu 1,007). Sogar vor diesem Versuch sagte Compton in seinem Bericht vom 1. Juli voraus, daß ein k-Wert von zwischen 1,04 und 1,05 in einer Einheit mit hochgereinigtem Uranoxyd und Graphit erreichbar sei, vorausgesetzt, daß die Luft entfernt werde (um n-Absorption durch Stickstoff zu vermeiden).

Ein Hilfsexperiment; verzögerte Neutronen

6.23. Wir werden die Mehrzahl der während dieser Periode durchgeführten Hilfsexperimente unerwähnt lassen. Aber eines, nämlich die Untersuchung der verzögerten Neutronen, wollen wir erörtern, da es ein gutes Beispiel für diese Art von Versuchen ist und einen bisher nicht erwähnten Effekt betrifft, der für die Führung einer Ketten-Reaktions-Einheit von großer Wichtigkeit ist.

6.24. Man wußte aus früheren Untersuchungen, von denen einige bereits veröffentlicht waren, daß etwa 1 % der im Spaltprozeß ausgesandten Neutronen nicht sofort emittiert werden, sondern in abnehmender Menge während einer Zeitperiode abgegeben werden, eine Tatsache, die an die Emission von β-Strahlen durch kurzlebige radioaktive Substanzen erinnert. Einige Halbwertszeiten waren beobachtet worden, die längste war von der Größenordnung einer Minute.

6.25. Es wurde schon früh festgestellt, daß diese Verzögerung eine Art von Trägheit der Kettenreaktion und eine große Erleichterung für die Beherrschung der Reaktion bedeutet. Wenn nämlich der effektive Vermehrungsfaktor einer Erzeugungseinheit etwas größer als 1 ist, dann kann die Neutronendichte (in diesem Falle der Verzögerung des N-Austritts) auf nicht so gefährlich hohe Werte ansteigen, wenigstens nicht sofort, sondern sie wird allmählich wachsen und damit eine Möglichkeit der Regulierung ergeben. (Andere mit dem Prozeß verknüpfte Zeitintervalle, wie z. B. zwei Zusammenstöße, sind zu klein, um ausgenutzt zu werden.)

6.26. Auf Grund der Wichtigkeit dieses Effektes der verzögerten Neutronen für die Regulierung entschloß man sich, die früheren Messungen zu wiederholen und zu verbessern. (Die Tatsache, daß dies eher eine Wiederholung als eine Neubemessung war, ist auch typisch für die vielen physikalischen Arbeiten während dieser Zeit.) Eine Beschreibung des Versuchs ist im Anhang 3 gegeben. Die Resultate ergaben, daß 1 % der Neutronen, die bei einer Uraniumspaltung ausgesandt werden, mindestens um 0,01 sec. verzögert sind und daß 0,07 % eine Verzögerung von etwa 1 Minute erleiden. Entwirft man also eine Konstruktionseinheit so, daß der effektive Wert des Multiplikationsfaktors k nur 1,01 beträgt, dann genügt der Anteil der verzögerten Neutronen, um eine einfache Kontrolle zu ermöglichen.

Die erste Erzeugungseinheit mit selbständig aufrechterhaltener Kettenreaktion

6.27. Im Herbst 1942 standen in Chicago genügend Graphit, Uranoxyd und Uranmetall zur Verfügung, um den Versuch zu rechtfertigen, eine wirkliche Kettenreaktionseinheit mit selbständigem Ablauf aufzustellen. Immerhin war die zur Verfügung stehende Metallmenge noch klein — nur etwa sechs Tonnen — und auch die übrigen Materialien waren nicht allzu reichlich vorhanden und außerdem von unterschiedlicher Qualität. Diese Umstände waren für den Entwurf maßgeblicher als das Ziel höchster Wirksamkeit.

6.28. Diese Konstruktionseinheit wurde nach dem Gitterprinzip aufgebaut mit Graphit als Bremsstoff und Metall- oder Oxydbrocken als Reaktionseinheiten, die regelmäßig innerhalb des Graphits gitterartig verteilt waren. Meßinstrumente wurden an verschiedenen Punkten innerhalb der Einheit oder in ihrer Nähe angebracht, um die Neutronenintensität anzuzeigen; bewegliche Streifen von Absorptionsmaterial dienten als Regulatoren. (Eine vollständige Beschreibung der Einheit findet sich im Anhang 4.) Da man als sicher annehmen konnte, daß immer einige Neutronen aus spontanen Spaltprozessen oder aus anderen Quellen vorhanden sind, war man davon ausgegangen, daß die Reaktion von selbst in Gang komme, sobald der Aufbau eine kritische Größe

erreiche, wenn man nicht Regulierstreifen in «Verzögerungs»-position einsetze. Folglich setzte man die Regulierstreifen am Anfang in eine passende «Verzögerungs»position und maß häufig die Neutronenintensität. Das war ein Glück, denn es ergab sich, daß die Annäherung an die kritischen Bedingungen in einem früheren Stadium des Aufbaus eintrat, als man vorausgesehen hatte.

6.29. Die Erzeugungseinheit wurde als sich selbst aufrecht erhaltendes System am 2. Dezember 1942 in Gang gesetzt. Soweit wir wissen, war dies das erstemal, daß menschliche Wesen je eine selbstlaufende Kern-Kettenreaktion in Gang gesetzt haben. Anfangs ließ man die Erzeugungseinheit auf einem Energieniveau von $^1/_2$ Watt laufen, aber schon am 12. Dezember erhöhte man das Energieniveau auf 200 Watt.

Die in der Einheit entwickelte Energie

6.30. Bei diesen Experimenten wurden keine direkten Messungen der freigesetzten Energie gemacht. Die Anzahl der in der Sekunde in der Einheit ausgesandten Neutronen wurde durch die Aktivität standardisierter Indiumfolien abgeschätzt. Daraus errechnete man mit Hilfe der Kenntnis der pro Spaltung erzeugten Neutronen den Betrag der freigesetzten Energie (Wattzahl).

Schlussfolgerung

6.31. Durch dieses Experiment vom 2. Dezember, das gerade stattfand, als ein Revisionskomitee das Chicago-Projekt prüfte, wurden beim Metallurgical Laboratory offensichtlich alle Zweifelschatten hinsichtlich der ersten Frage verscheucht; eine selbstlaufende Kern-Kettenreaktion war in einem System mit normalem Uran herbeigeführt worden. Der Versuch war durchgeführt worden unter der Hauptleitung von *E. Fermi,* dem vor allem die Gruppen beistanden, die *W. H. Zinn* und *H. L. Anderson* unterstanden. *V. C. Wilson* war mit seiner Gruppe in weitem Umfang verantwortlich für die Entwicklung der Instrumente und der Regulierung, und eine ganze Anzahl anderer Persönlichkeiten des Laboratoriums haben zu dem Erfolg des Unternehmens beigetragen.

Beziehungen zwischen der Energieerzeugung und der Plutoniumproduktion

6.32. Das unmittelbare Ziel beim Aufbau der Uran-Graphit-Einheit war der Nachweis, daß man unter bestimmten Bedingungen eine Kettenreaktion in Gang bringen könne, aber das Endziel des Laboratoriums war die Erzeugung von Plutonium durch Kettenreaktion. Demzufolge besteht Interesse an der Beziehung zwischen der Energie, mit der eine solche Einheit arbeitet, und der Geschwindigkeit, in welcher sie Plutonium erzeugt. In einer ersten Annäherung kann man dieses Verhältnis ziemlich leicht schätzen. Eine Erzeugungseinheit, die stationär läuft, muß ebensoviel Neutronen hervorbringen, wie in ihr untergehen. Für jedes im Uran 235 absorbierte thermische Neutron wird eine bestimmte Neutronenanzahl η ausgesandt. Eines von diesen Neutronen wird für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion benötigt. Nehmen wir an, daß alle übrigen Neutronen durch U-238 für die Erzeugung von Plutonium verbraucht werden, dann werden folglich $\eta - 1$ Atome von Plutonium 239 für jeden Spaltprozeß erzeugt. Andererseits setzt jede Spaltung ungefähr 200 Mev (Millionen Elektronvolt) Energie frei. Daraus ergibt sich, daß die Bildung von $\eta - 1$ Plutonium-Atomen von einer Energiebefreiung von 200 Mev begleitet ist. Da nun $\eta - 1$ eine kleine Zahl ist, können wir vermuten, daß zur Erzeugung von 1 kg Plutonium am Tage eine Kettenreaktionseinheit zwischen 500 000 und 1,5 Millionen Kilowatt[1] Energie freigegeben wird.

[1] Wenn von zwei Spaltungsneutronen je eines die Kettenreaktion aufrecht erhält, das andere zur Bildung eines Pu-Atoms führt, dann entsteht durch das erstere jedesmal eine freie Spaltungsenergie von 200 Mev für jedes durch das zweite gebildete Pu-Atom. Pu hat die Massenzahl 239. Massenzahl-Einheit ist Grammgewicht von $^1/_{16}$ des O-Atoms: ca. $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ gr (oder annähernd Neutronengewicht). Dies multipliziert mit 239 ergibt als Grammgewicht des Pu-Atoms rund $4 \cdot 10^{-22}$ gr. Demnach enthält 1 kg die Anzahl $1000/4 \cdot 10^{-22} = 2{,}5 \cdot 10^{24}$ Atome. Somit entstehen ebensoviele Energiebefreiungen von je $250 \cdot 10^6$ ev, also pro kg Pu rund $5 \cdot 10^{26}$ Mev, das entspricht 22 Millionen Kilowattstunden Energie. Wird dies als Tagesleistung (1 kg Pu pro Tag) angesetzt, so hat das Kraftwerk eine Dauerleistung von zirka 900 000 Kilowatt. Das ist eine Überschlagsrechnung. Da etwas mehr als 2 Neutronen pro Spaltung entstehen, andererseits Neutronenverluste auftreten, kann man, wie im Text, von 500 000 bis 1 500 000 kW sprechen.

Die soeben beschriebene erste Kettenreaktionseinheit arbeitete mit einem Maximum von 200 Watt. Setzt man voraus, daß eine einzelne Bombe größenordnungsmäßig 1—100 kg Plutonium erfordert, so müßte die soeben beschriebene Erzeugungseinheit 70 000 Jahre arbeiten, um das Plutonium für eine einzige Bombe zu liefern. Offenbar war also das Problem einer Erzeugung großer Mengen von Plutonium noch nicht gelöst.

Plutonium-Chemie

6.33. Die zweite spezielle Aufgabe des Metallurgical Laboratory bestand darin, festzustellen, ob beim Ablauf einer Kettenreaktion die chemische Trennung des Plutoniums von den anderen Stoffen, mit denen es zusammen ist, sich durchführen läßt. Notwendigerweise mußte der Fortschritt in dieser Richtung langsamer vor sich gehen als die Erzielung einer Kettenreaktion. Anfangs geschah wenig im Metallurgical Laboratory hinsichtlich der chemischen Probleme, obwohl das Extraktionsproblem an einer Konferenz erörtert wurde, die bald nach der Organisation des Projekts stattfand, und nachdem die Seaborg-Gruppe an der Universität von California in ihrer Arbeit über Plutonium ermutigt worden war. Am 22. und 23. April 1942 fand in Chicago eine allgemeine Chemiekonferenz statt, an der *F. H. Spedding, E. W. Thiele, G. T. Seaborg, J. W. Kennedy, H. C. Urey, E. Wigner, N. Hilberry, G. E. Boyd, I. B. Johns, H. A. Wilhelm, I. Perlman, A. C. Wahl* und *J. A. Wheeler* teilnahmen. *Spedding* eröffnete die Konferenz und legte dar, daß es zwei Hauptaufgaben für die Chemiker gebe: erstens Plutonium in den Mengen und der Reinheit abzutrennen, wie es für den Krieg benötigt werde; zweitens zu einem guten Verständnis der einschlägigen chemischen Vorgänge vorzudringen, die für die Konstruktion und den Betrieb einer solchen Einheit notwendig sei. Das Abtrennungsproblem sollte in Chicago von einer neuen Gruppe unter der Leitung von *Seaborg,* ferner von *Johns* und *Wilhelm* in Ames und von *Wahl* und *Kennedy* in Fortsetzung der Untersuchungen an der California-Universität studiert werden. Andere in enger Verbindung stehende Gruppen sollten diejenige von *C. D. Coryell,* die über Spaltprodukte arbeitete, und die von Boyd, welche sich mit analytischen Problemen befaßte, sein. Die Chemikergruppe in Chi-

cago wuchs von da an schnell. Man errichtete im Spätjahr 1942 einen Neubau, um sie aufzunehmen, und dieser Neubau wurde dann noch vergrößert. Zusammenfassend machte die Lösung zahlreicher chemischer Probleme eine der bemerkenswertesten Leistungen des Metallurgical Laboratory aus.

6.34. Das erste Isotop von Plutonium, das man entdeckte und untersuchte, war nicht das Isotop 239, sondern das Isotop 238, das ein Alphastrahler mit einer Halbwertszeit von ungefähr 50 Jahren ist. U-238, mit Deuteronen bombardiert, ergibt $_{93}Np^{238}$, und dieses baut unter Beta-Emission auf $_{94}Pu^{238}$ ab (siehe Zeichnung auf Seite 24). Der erste Nachweis der tatsächlichen Existenz dieser neuen Elemente (wenn man die ursprüngliche irrige Deutung der Uranspaltung als Beweis für ihre Existenz ausscheidet) wurde von *E. McMillan* und *P. H. Abelson* erzielt, die 93-238 von Uranium, das in dem Berkeley-Cyclotron mit Deuteronen bombardiert worden war, trennten. Das neue Element wurde als Betastrahler erkannt, aber die vorhandene Probe war zu klein, um das Tochterprodukt 94-238 abzutrennen. Später hatte man genug Plutonium 238, so daß *Seaborg, Kennedy* und *Wahl* mit dem Studium seiner chemischen Eigenschaften im Winter 1940/41 beginnen konnten. Diese Autoren benutzten die «Leuchtspurchemie» mit Trägern, wie man das in der Radiochemie zu tun gewohnt ist. Bei dieser Untersuchung wurden viele chemische Eigenschaften des Plutoniums festgestellt und einige mögliche chemische Reaktionen entwickelt, mit Hilfe deren Pu-239 aus einer Kettenreaktionseinheit herausgenommen werden kann. Der Erfolg der Experimente im Bereich der Leuchtspurversuche führte zu dem Plan, genug Pu-239 zu erzeugen, um es im Rahmen der Ultramikrochemie-Methoden wie eine gewöhnliche Substanz behandeln zu können. Diese Quantitäten wurden durch langzeitige Bombardierung von einigen 100 Pfund Uranyl-Nitrat mit Neutronen erzeugt, die mit Cyclotronen, zuerst in Berkeley und später in der Washington-Universität in St. Louis, gewonnen wurden. Ende 1942 besaß man etwas mehr als 500 Mikrogramm in Form von reinen Plutoniumsalzen. Obwohl diese Menge so klein ist, daß man nicht einmal einen Stecknadelkopf davon machen könnte, war sie doch für die Mikrochemiker ausreichend, um ihnen beträchtliche Informationen zu liefern; denn

ein Mikrogramm wird als hinreichend betrachtet, um Experimente mit der Waage, Titrationen, Löslichkeitsstudien usw. zu machen.

6.35. Nach seiner Stellung im periodischen System kann man erwarten, daß Plutonium den seltenen Erden oder dem Uran, Thorium oder Osmium ähnlich ist. Welchem von diesen es am nächsten kommt, hängt natürlich von der Gruppierung der äußersten Elektronenschale ab, und diese konnte man kaum voraussagen. Im ganzen ähnelt Plutonium mehr dem Uran als irgend einem anderen der genannten Elemente und könnte sogar als zweites Glied einer neuen Serie seltener Erden betrachtet werden, die mit Uran beginnt. Ziemlich früh wurde entdeckt, daß es mindestens zwei Oxydationsstufen des Plutoniums gibt. (Jetzt weiß man, daß es deren vier gibt im Einklang mit den positiven Wertigkeiten 3, 4, 5, 6.) Die erfolgreiche mikrochemische Herstellung von mehreren Salzverbindungen des Plutoniums und das Studium ihrer Eigenschaften führten zu dem allgemeinen Schluß, daß die chemische Trennung des Plutoniums von den anderen Materialien in der Erzeugungseinheit möglich sei. Dieser Schluß bedeutet die Erreichung des zweiten unmittelbaren Ziels, das sich das Metallurgical Laboratory gestellt hatte. Auf diese Weise konnte Ende 1942 das Plutonium, das 18 Monate vorher vollständig unbekannt war, als ein Element betrachtet werden, dessen chemisches Verhalten ebenso bekannt ist wie das mehrerer Elemente des alten periodischen Systems.

VERMISCHTE STUDIEN

6.36. Neben den Hauptproblemen, die wir erwähnt haben, also der Kettenreaktion, der chemischen Trennung und der Planung einer Produktionsanlage, gab es eine Unzahl kleinerer Probleme, die gelöst werden mußten. Unter den wichtigeren von ihnen war die Verbesserung der Neutronenzähler, der Ionisationskammern und anderer Instrumente, ferner das Studium der Korrosion des Urans und Aluminiums durch Wasser und andere in Frage kommende Kühlflüssigkeiten, ferner die Feststellung der Wirkung der Temperaturänderungen auf die Wirkungsquerschnitte der Neutronen, sodann die Fabrikation von Uranium-

stäben und -röhren, das Studium der Spaltprodukte und schließlich die Feststellung der biologischen Effekte der Strahlung. Als typischen Fall dieser Art der Untersuchungen wollen wir die Entwicklung der Methoden erwähnen, die unter der Leitung von *E. Creutz* für die Fabrikation und das Überziehen von Uranmetall entwickelt worden sind. Ohne die Durchführung dieser sekundären Untersuchungen hätte das ganze Projekt nie zu Ende geführt werden können. Um noch eine Idee über den Umfang der Untersuchungen zu geben, sind im Anhang 5 die Titel von 20 Berichten angeführt, eine Auslese von etwa 400, die im Jahre 1942 ausgegeben wurden.

DIE REAKTION MIT SCHNELLEN NEUTRONEN

6.37. Das dritte der unmittelbaren Ziele des Metallurgical Project bestand darin, theoretisch und experimentell Daten über die Reaktion mit raschen Neutronen zu bekommen, wie sie für eine Atombombe benötigt werden. Diese Seite des Unternehmens wurde anfangs von *G. Breit* an der Universität Wisconsin geplant und später von *J. R. Oppenheimer* an der Universität California weitergeführt. Da die praktische Konstruktion der Bombe das Schlußglied des Problems bildet, war das Studium dieser Reaktionen nicht so sehr dringend. Infolgedessen wurde theoretischen Problemen bis zum Sommer 1942 keine große Aufmerksamkeit geschenkt; dann aber wurde in Chicago unter der Leitung von *Oppenheimer* hierfür eine Forschergruppe organisiert.

6.38. Mittlerweile waren die experimentellen Untersuchungen besonders auf Drängen von *G. Breit* unter der Oberleitung des Metallurgical Project an mehreren Instituten vorangeschritten, die über geeignete Ausrüstungen für Studien mit schnellen Neutronen verfügten (Carnegie Institution of Washington, the National Bureau of Standards, Cornell University, Purdue University, University of Chicago, University of Minnesota, University of Wisconsin, University of California, Standard University, University of Indiana, and Rice Institute). Diese Forschungsaufgaben umfaßten die Untersuchung der Wirkungsquerschnitte für Streuung, Absorption und Spaltung, ferner das Energiespektrum von Spaltungsneutronen und die zeitliche Verzögerung bei der Emis-

sion von Spaltungsneutronen. Die Arbeit stellte hauptsächlich eine Zwischenstufe in der Bestätigung und Ausdehnung früherer Messungen dar, aber sie gelangte nicht zu einem endgültigen Abschluß. Später wurden sie an einer anderen Stelle konzentriert (siehe Kapitel XII).

6.39. Wie im «Durchführbarkeitsbericht» (Feasibility Report) angegeben (in einem Abschnitt, der von *J. H. Manley, J. R. Oppenheimer, R. Serber* und *E. Teller* geschrieben ist), hatte sich die Lage hauptsächlich nur in einer Hinsicht wesentlich geändert, seit im Vorjahre der Bericht der National Academy erschienen war. Die theoretischen Untersuchungen zeigten jetzt, daß die Zerstörungswirkung der Atombombe größer sein werde, als man in dem National Academy Report angegeben hatte. Immerhin war die kritische Größe der Bombe noch unbekannt. Auch hatte man einige Untersuchungen über die Zündung der Bombe angestellt, aber im ganzen war man zu keinem sicheren Ergebnis gekommen.

II. TEIL. FORTSCHRITTE IN RICHTUNG AUF DAS ENDZIEL

DIE PLANUNG EINER ERZEUGUNGSANLAGE

Planung und technische Arbeit

6.40. Wie wir gesehen haben, waren Ende 1942 die nächsten Ziele des Metallurgical Laboratory erreicht, aber die letzten Ziele, Erzeugung großer Mengen von Plutonium, der Entwurf und die Fabrikation von Bomben, waren weit von ihrer Erfüllung. Man übertrug die Verantwortlichkeit für den Entwurf und für die Erzeugung der Bomben ungefähr zu dieser Zeit an eine andere Gruppe; deren Tätigkeit ist in Kapitel XII dargelegt. Dagegen blieb für die Erzeugung von Pu-239 in großen Mengen das Metallurgical Laboratory nach wie vor verantwortlich, jedoch seit Ende 1942 in Verbindung mit der Du Pont Company.

6.41. Auf Grund der vorliegenden Kenntnisse war es klar, daß man eine Plutoniumproduktion zwischen 1 kg im Monat und 1 kg im Tag nötig habe. Für eine Produktion von täglich 1 kg ergibt sich die Notwendigkeit einer Kraftanlage von 500 000 bis 1 500 000 Kilowattleistung. (Die Endkapazität der hydroelektrischen Ener-

gieanlage an dem Grand Coulee Dam wird mit 2 000 000 Kilowatt erwartet.) Offenbar war die Errichtung einer derart großen Plutonium-Erzeugungsanlage ein riesiges Unternehmen, selbst wenn man die Nutzbarmachung der dabei freiwerdenden thermischen Energie nicht versuchte. Nichtsdestoweniger waren im November 1942 die meisten Probleme klar bestimmt und die Lösungsversuche vorgeschlagen. Zwar werden diese Probleme einigermaßen im Detail im folgenden Kapitel erörtert, doch sollen sie hier kurz erwähnt werden.

6.42. Da in jeder größeren Plutoniumerzeugungseinheit eine beträchtliche Wärmeenergie entsteht, ergibt sich als erstes Problem, ein Kühlungssystem zu entwerfen. Bevor man aber ein solches System festlegen kann, muß man die Maximaltemperaturen ausfindig machen, bis zu welchen sich die Erzeugungseinheit ohne Gefahr erhitzen darf, und muß zu diesem Zweck die Faktoren — sowohl die vom Kern als auch die von der Konstruktion abhängigen — kennen, die diese Temperatur bestimmen. Ein anderes Hauptproblem ist die Methode für die Einfüllung und Entleerung des Uraniums, ein Problem, das durch die Schutzvorrichtungen und das Kühlsystem kompliziert wird. Der Strahlenschutz muß vorgesehen werden sowohl für die Einheit selbst als auch für die chemische Trennanlage. Die Art der Trennanlage hängt davon ab, welchen speziellen Separationsprozeß man benutzt; also muß darüber entschieden werden. Schließlich sind die Geschwindigkeit der Beschaffung und des Baues erstrangige Faktoren sowohl bei der Planung der Erzeugungseinheit als auch der chemischen Anlage.

MÖGLICHE TYPEN DER ANLAGE

6.43. Nach Prüfung der prinzipiellen Faktoren, von denen der Entwurf einer Anlage abhängt, das ist Kühlung, Leistung, Sicherheit, Schnelligkeit der Errichtung, schlug der Durchführbarkeitsbericht eine Anzahl möglicher Anlagetypen vor, und zwar in der nachstehenden Reihenfolge der Wertung:

I. a) eine Gitterkonstruktion von gewöhnlichem Uranium in Graphit als Bremsstoff mit Heliumkühlung; b) das gleiche mit Wasserkühlung; c) das gleiche mit Kühlung durch geschmolzenes Wismut;

II. eine Gitterkonstruktion mit gewöhnlichem Uranmetall und innerhalb von schwerem Wasser als Bremsstoff;

III. Uranium angereichert im Isotop 235 mit Graphit, schwerem Wasser oder gewöhnlichem Wasser als Bremsstoff.

Die Typen II und III waren nicht von unmittelbarem Interesse, denn es stand weder angereichertes Uranium noch schweres Wasser zur Verfügung. Gleichwohl wurden die beiden Typen weiter entwickelt, denn man hätte auf sie zurückgreifen müssen, wenn kein anderer Typus sich als durchführbar erwiesen hätte. Der Typus I c) mit Kühlung durch flüssiges Wismut schien vielversprechend hinsichtlich der Nutzbarmachung der freiwerdenden Wärmeenergie, aber man hatte das Gefühl, daß die damit verknüpften technischen Probleme noch lange Zeit für ihre Lösung erforderten.

Die Versuchsanlage in Clinton

6.44. Während dieser Zeit, im zweiten Halbjahr 1942, erkannte man bei der Planung der Produktionsanlagen, daß eine Anlage mittlerer Größe erwünscht wäre. Dafür sprachen zwei Gründe: erstens sollte es eine Versuchsanlage sein; zweitens sollte sie dazu dienen, einige Gramm Plutonium zu erzeugen, die man dringend für experimentelle Zwecke benötigte. Geplant als eine luftgekühlte Anlage von 1000 Kilowatt Leistung hätte diese in Clinton, Tennessee, aufgebaute mittlere Erzeugungseinheit beide Aufgaben erfüllen können, wenn man Heliumkühlung für die Hauptanlage vorsah. Obwohl die Pläne für die Hauptanlage in dem Sinne geändert wurden, daß man Wasserkühlung vorzog, wurde die Versuchsanlage mit Luftkühlung weitergeführt in der Annahme, daß das zweite Ziel so schneller erreicht werde. So wurde sie keine Versuchsanlage, ausgenommen für die chemische Trennung. Tatsächlich wurde die Hauptanlage aufgebaut, ohne daß man aus einer wirklichen Versuchsanlage Nutzen zog, gerade als ob die hydroelektrischen Generatoren in Grand Coulee nur nach der Erfahrung entworfen worden wären, die man mit einem Generator von ganz anderem Typ und einem kleinen Bruchteil der Leistung gewonnen hätte.

SPEZIELLE VORSCHLÄGE

6.45. Wie *Hilberry* in seinem Durchführbarkeitsbericht vom 26. November 1942 ausführte, waren die Aussichten für eine Graphiteinheit mit Heliumkühlung verheißungsvoll hinsichtlich einer sofortigen Produktion; die Einheit mit schwerem Wasser als Bremsstoff und mit schwerem Wasser oder gewöhnlichem Wasser als Kühlflüssigkeit gewährte dagegen bessere Aussichten für einen eventuellen vollen Großbetrieb. Es wurden eine Anzahl spezieller Vorschläge gemacht für die Errichtung solcher Anlagen und für die weiteren Studien der damit verknüpften Probleme. Die Vorschläge waren auf Zeit- und Kostenschätzungen aufgebaut, die unvermeidlicherweise kaum besser als rohe Schätzungen sein konnten. Als Ergebnis weiterer Untersuchungen gestaltete sich das tatsächliche Bauprogramm, das in späteren Kapiteln beschrieben wird, sehr verschieden von dem ursprünglich vorgeschlagenen.

ZUSAMMENFASSUNG

6.46. Das Beschaffungsproblem, das den Fortschritt verzögert hatte, war Ende 1942 im wesentlichen gelöst. Eine kleine selbstlaufende Graphit-Uraniumeinheit war im November 1942 konstruiert und am 2. Dezember zum erstenmal in Betrieb gesetzt worden mit einem Energieniveau von $^1/_2$ Watt und später von 200 Watt. Die Einheit war leicht zu regulieren dank des Phänomens der verzögerten Emission von Neutronen. Man hatte im ganzen 500 Mikrogramm Plutonium mit dem Cyclotron hergestellt und chemisch vom Uran und den Spaltprodukten getrennt. Man hatte von der Plutoniumchemie genügend Kenntnisse, um sicher zu sein, daß die Trennung in einem relativ großen Umfang möglich sei. Die Theorie der Bombe hatte keinen großen Fortschritt gemacht, aber Berechnungen waren nachgeprüft und ausgedehnte Experimente mit schnellen Neutronen angestellt worden. Auf alle Fälle waren die Aussichten für die Bombe besser als ein Jahr zuvor.

6.47. Viele experimentelle und Planungsarbeiten wurden aufgewandt, um das Problem der Errichtung und des Betriebs einer Großproduktionsanlage zu umgrenzen. Hinsichtlich der Wahl

des Anlagetypus war ein gewisser Fortschritt erzielt worden. Die erste Wahl fiel damals auf eine Einheit mit metallischem Uranium und Graphit, die entweder mit Helium oder Wasser gekühlt werden sollte. Für die Errichtung von Versuchs- und Produktionsanlagen waren spezielle Programme entworfen worden. Das Programm enthielt Zeit- und Kostenschätzungen.

VII. KAPITEL. DAS PLUTONIUM-PRODUKTIONS-PROBLEM IM FEBRUAR 1943

EINLEITUNG

NOTWENDIGKEIT EINER ENTSCHEIDUNG

7.1. Am 1. Januar 1943 hatte das «Metallurgical Laboratory» (M. L.) sein erstes Ziel, eine Ketten-Reaktions-Einheit, erreicht und war auf gutem Wege zum zweiten Ziel, einem Prozeß, das Plutonium, das in einem solchen Einheitsgebilde erzeugt wird, zu extrahieren. Offenbar war damit die Zeit gekommen, präzisere Pläne für eine Produktionsanlage aufzustellen. Die Entscheidungen über das weitere Vorgehen wurden von dem Policy Committee (vergl. Kap. V) auf Grund von Empfehlungen des Laboratoriumdirektors *A. H. Compton,* des S_1-Exekutivkomitees und des Überwachungskomitees getroffen, das Chicago im Dezember 1942 besucht hatte. Die einzige Entscheidung, die bis jetzt getroffen war, bestand darin, daß die erste Ketten-Reaktions-Einheit abmontiert und dann in geringer Entfernung von Chicago wieder aufgebaut werden solle und daß eine Plutonium-Anlage von 1000 kW Leistung in Clinton, Tennessee, errichtet werden solle.

DAS AUSMASS DER PRODUKTION

7.2. Die erste zu treffende Entscheidung betraf das Ausmaß der Produktion, das erstrebt werden sollte. Aus Sicherheitsgründen darf die Ziffer, die damals beschlossen wurde, hier nicht mitgeteilt werden. Sie war sehr groß.

DIE GRÖSSE DES PROBLEMS

7.3. Wie wir gesehen haben, entspricht die Produktion von 1 Gramm Plutonium pro Tag der Erzeugung einer Energie von der Größenordnung 500—1500 kW[1]. Infolgedessen muß eine An-

[1] Genauer sollte statt Energie hier Leistung stehen. Energie würde in kWh (Kilowattstunden) anzugeben sein. Gemeint ist: Bei einer konstanten Leistung (Arbeit pro Zeiteinheit) von 500—1500 kW würde in einer solchen Pu-Anlage ein Gramm Pu erzeugt.

lage für eine Plutonium-Produktion in großem Maßstab einen sehr großen Energiebetrag freisetzen. So ergab sich das Problem, eine Anlage von dieser Kapazität zu entwerfen, und zwar auf der Basis der Erfahrung mit einer Erzeugungs-Einheit, die mit einem Energieniveau von nur 0,2 kW arbeitete. Hinsichtlich der Plutoniumtrennung, die ebenso wichtig war, ergab sich die Notwendigkeit, eine Anlage für die Extraktion und die Reinigung zu planen, die jeden Tag mehrere Gramm Plutonium von einigen Tonnen Uran abtrennen kann, und diese Planung mußte vorgesehen werden auf Grund von Informationen, die man mit mikrochemischen Studien, mit einem halben Milligramm Plutonium erzielt hatte. Gewiß, es standen bereits Informationen zur Verfügung für die Entwürfe einer großen Uran-Einheit und einer großen Trennanlage, Informationen, die durch die Hilfsexperimente und durch die im großen Maßstab angestellten Separationsstudien mit Uran als Ausgangsmaterial für Plutonium gewonnen worden waren. Aber auch so waren die vorgeschlagenen Extrapolationen für Ketten-Reaktions-Einheiten und Trennprozesse schwankend. In Friedenszeiten hätte es keinen Ingenieur oder Wissenschaftler von gesundem Sinn gegeben, der eine solche Vergrößerung in einem einzigen Sprung in Erwägung gezogen hätte, und selbst im Kriege lag die Rechtfertigung dafür nur in der Möglichkeit, rasch gewaltige Resultate zu erzielen.

Verteilung der Verantwortung

7.4. Sobald die Entscheidung getroffen war, mit der Großproduktion von Plutonium vorwärts zu machen, wurde offensichtlich, daß eine große Ausdehnung der Organisation zu erfolgen hätte. Die *Stone and Webster Engineering Corporation* wurde als allgemeine Ingenieur- und Konstruktionsfirma für das DSM-Projekt gewählt, bald nachdem im Juni 1942 der «*Manhattan District*» mit dem Bau der Anlagen beauftragt worden war. Im Oktober 1942 wurde klar, daß verschiedene Teile des Werkes zu weit auseinander lagen und technisch zu kompliziert waren, um von einer einzigen Gesellschaft geleitet zu werden, insbesondere mit Rücksicht auf das notwendige rapide Tempo. Infolgedessen wurde beschlossen, daß es nützlich sei,

wenn Stone and Webster von jenem Teil des Werkes entlastet würden, der mit dem Aufbau der Plutoniumproduktion zu tun hatte. Das geschah, und General *Groves* wählte die *E. I. du Pont de Nemours and Company* als die geeignetste Firma, diesen Teil des Unternehmens durchzuführen. Die Vereinbarungen, die «Manhattan District» mit verschiedenen Industrien traf, nahmen verschiedene Formen an. Die Vereinbarungen mit du Pont seien als Beispiel im einzelnen dargelegt.

7.5. General Groves schnitt diese Frage gegenüber W. S. Carpenter junior, dem Präsidenten von du Pont, an, und nach ausführlicher Besprechung mit ihm und andern Beamten der Firma stimmte du Pont zu, die Arbeit zu übernehmen. Bei der Übernahme wurde unter Zustimmung aller Beteiligten festgestellt, daß du Pont die Arbeit nur übernehme, weil das Kriegsdepartement die Unternehmung als äußerst wichtig betrachte und weil General Groves konstatierte, daß diese Ansicht über die Wichtigkeit auch die persönliche Ansicht des Präsidenten der Vereinigten Staaten, des Kriegssekretärs, des Generalstabschefs und General Groves selber sei, und weil General Groves versicherte, daß du Pont bei weitem die beste Organisation für dieses Geschäft besäße. Zur gleichen Zeit wurde anerkannt, daß die du Pont Company nunmehr alle mit dem Krieg zusammenhängenden Aufgaben auf sich genommen habe, die ihrer Organisation ohne ungebührliche Schwierigkeiten zugemutet werden könnten.

7.6. Die du Pont Company bestand bei der Übernahme der Aufgabe darauf, daß sie ohne Gewinne durchgeführt werden müsse und ohne Patentrechte irgendwelcher Art, die daraus erwachsen könnten. Immerhin verlangte die du Pont Company mit Rücksicht auf den unbekannten Charakter des Arbeitsfeldes, in das man sie gebeten hätte einzutreten, und mit Rücksicht auf die unvorherzusehenden Zufälle, daß die Regierung der Gesellschaft höchsten Schutz gegenüber Verlusten gewähre, die ihr daraus entstehen könnten.

7.7. Der «cost-plus-fixed-fee-Kontrakt» zwischen der Regierung und du Pont setzte einen fixen Gewinn von 1 Dollar fest[1]. Die Regierung willigte ein, alle Kosten des Unternehmens durch

[1] Das Wortgebilde bedeutet: Ersatz aller Selbstkosten und ein fixes Honorar (hier 1 Dollar).

direkte Rückzahlung oder durch Zuschüsse, die im Kontrakt vorgesehen waren, zu zahlen zwecks Deckung der Verwaltungskosten und der allgemeinen Spesen für das Projekt, in Übereinstimmung mit der normalen du Pontschen Rechnungsführung, festgesetzt durch beglaubigte öffentliche Prüfungsbeamte. Auf Grund der Bestimmungen dieses Kontraktes wurden alle Zuschüsse, die nicht wirklich von der du Pont Co. verausgabt wurden, am Schlusse wieder an die Vereinigten Staaten zurückbezahlt. Der Kontrakt sah auch vor, daß der Gesellschaft keine Patentrechte zuwachsen sollten.

7.8. Die speziellen Verantwortlichkeiten, die du Pont übernommen hatte, bestanden darin, eine kleine Probeanlage in den Clinton Engineer Works in Tennessee zu entwerfen, zu planen und aufzubauen und in den Hanford Works im Staate Washington eine Großanlage für Plutonium-Produktion mit großer Kapazität ebenfalls vorzubereiten, zu planen und aufzubauen. Mit Rücksicht auf die enge Verbindung mit den grundlegenden Forschungen sollte die Clinton - Probeanlage unter der Leitung der Universität von Chicago arbeiten. Eine große Anzahl von maßgebenden Technikern der du Pont Gesellschaft wurde aushilfsweise in Chicago und Clinton eingesetzt, um die Universität mit dem nötigen Personal zu versehen, speziell mit Leuten von industrieller Erfahrung, und um einen Teil dieses Personals für den kommenden Dienst in Hanford zu schulen.

7.9. In dem Umfang, als die du Pont gebeten wurde, aus dem ihr vertrauten Gebiet, der Chemie, in ein neues Feld überzugehen, das die Kernphysik einschloß, war man einig darüber, daß sie notwendigerweise in hohem Grade von dem «M. L.»[1] der Universität Chicago hinsichtlich der grundlegenden Forschungen und Entwicklungsmethoden und in bezug auf Anleitung abhängig sei. Die du Pont Company hatte technische und industrielle Erfahrung, aber sie bedurfte des «M. L.» für die Kernphysik und radiochemische Erfahrung. Das «M. L.» machte die fundamentalen Forschungen über die Probleme, von dessen Entwurf und Arbeit der Probeanlage und der Groß-Produktions-Werkstätte abhingen. Es machte die Vorschläge für die wichtigen Konstruk-

[1] «M. L.» = Metallurgical Laboratory, Deckname siehe 6.2.

tionsteile der Plutoniumproduktion, der Rückgewinnungsprozesse und der Ausrüstung, antwortete auf die Spezialfragen, welche die du Pont stellte, und nahm teil an den endgültigen Entscheidungen und Planungen der Firma du Pont.

7.10. Die Hauptaufgabe der Clinton-Probeanlage war die Entwicklung von Methoden für die Plutonium-Rückgewinnung. Das Probewerk hatte natürlich eine Einheit für Plutoniumproduktion aufzubauen, um sich das Plutonium für die experimentelle Rückgewinnung herzustellen. Damals, mit den zur Verfügung stehenden Unterlagen, konnte die Clinton-Produktions-Einheit nicht als eine Vorstufe der Hanford-Produktions-Einheit konstruiert werden. Diese mußte infolgedessen entworfen, errichtet werden und arbeiten ohne erhebliche Anleitung durch die Clinton-Erfahrung. Tatsächlich mußten die Hanford-Rückgewinnungseinheiten in Planung und Einrichtung schon weit entwickelt werden, bevor die Clinton-Resultate zur Verfügung standen. Immerhin erwies sich die Clinton-Probeanlage als ein äußerst wichtiger Beitrag zur Lösung von manchen vollständig neuen Problemen, die in Hanford angeschnitten wurden. Das Werk produzierte auch kleine Mengen von Plutonium, die, in Verbindung mit Daten des M. L. über die Eigenschaften des Plutoniums, die Forschungen über den Gebrauch dieses Materials so erleichterten, daß manche Monate Zeit gewonnen wurde.

Wahl des Ortes für das Werk

7.11. Nachdem einmal der Produktionsmaßstab vereinbart und die Verantwortungen zugeteilt waren, mußte eine Entscheidung über die Art des Werkes und seinen Ort herbeigeführt werden. Der Platz im Tennesseetal, offiziell bekannt als Clinton Engineering Works, wurde von der Armee zur Durchführung des ganzen Programms erworben, wie es in dem Bericht an den Präsidenten empfohlen worden war (vergl. Kap. V).

7.12. Neue Erwägungen führten Ende 1942 General *Groves* zu dem Schluß, daß dieser Ort für eine Plutonium-Erzeugungs-Großanlage nicht isoliert genug sei. Damals hielt man es nicht für ausgeschlossen, daß eine große Einheit radioaktive Stoffe unter Umständen über ein so weites Gebiet verbreiten könnte, daß benachbarte Bevölkerungszentren in Gefahr gerieten. Außer der

Notwendigkeit der Isolation war noch die Notwendigkeit einer starken Energiequelle gegeben, die ursprünglich die Wahl des Platzes in Tennessee bestimmt hatte. Um nun diese beiden Notwendigkeiten zu vereinen, wurde ein neuer Platz gewählt und erworben, und zwar am Columbia-Fluß, im zentralen Teil des Staates Washington in der Nähe der Grand Coulee-Kraftleitung. Dieser Platz war bekannt unter dem Namen Hanford Engineering Works.

7.13. Da der Columbia-Fluß die beste Quelle für reines kaltes Flußwasser in diesem Lande ist, war der Hanford-Platz sowohl für das ursprünglich geplante, mit Helium gekühlte Werk wie für das wassergekühlte Werk, das man tatsächlich errichtete, geeignet. Die großen Entfernungen zwischen dem Hauptwerk von du Pont in Wilmington, Delaware, dem Versuchswerk in Clinton, Tennessee, dem M. L. in Chicago und schließlich dem Hanford-Platz waren äußerst unbequem, aber diese Trennung konnte nicht vermieden werden. Es war auch schwierig, Arbeiter an diesen Platz zu schaffen und für ihre Lebensbedingungen zu sorgen.

Entscheidung über die Art der Anlage

7.14. Die Entwicklung war tatsächlich noch nicht soweit fortgeschritten, um eine sorgfältig abgewogene Entscheidung über die beste Art der Plutonium-Erzeugungsanlage zu treffen, aber es mußte eine Entscheidung getroffen werden, um mit den Entwürfen anzufangen und sobald wie möglich mit dem Bau zu beginnen. Tatsächlich traf man eine probeweise Entscheidung und änderte sie später.

7.15. Im November 1942 entschied sich das M. L. zunächst für eine mit Helium gekühlte Anlage. Unter der Leitung von *T. Moore* und *M. C. Leverett* wurden vorläufige Pläne für eine solche Anlage ausgearbeitet. Die gemeinschaftlichen vorbereitenden Planungen dienten als Unterlage für die Wahl des Ortes, die Bestimmung der zusätzlichen Ausrüstung usw. Obwohl diese Studien zum Teil deswegen unternommen worden waren, weil man meinte, daß sie schneller für eine mit Helium gekühlte Anlage als für eine solche mit Wasserkühlung durchgeführt werden könnten, ergaben sich manche Schwierigkeiten. Inzwischen war

die theoretische Gruppe unter *Wigner* unter Mitarbeit des Ingenieur-Personals beauftragt worden, einen Bericht über eine wassergekühlte Anlage von großer Energieausbeute vorzubereiten. Diese Gruppe hatte sich von Anfang an für eine wassergekühlte Anlage interessiert und konnte daher die Resultate ihrer Studien in einem am 9. Januar 1943 ausgegebenen Bericht darlegen. Dieser Bericht enthielt viele wichtige Gedanken, die dann in den Plan für die Erzeugungsanlage in Hanford aufgenommen wurden.

7.16. Als die du Pont Co. auf der Bildfläche erschien, akzeptierte diese Firma zuerst den Plan mit Heliumkühlung, aber nach weiteren Studien entschied sie sich zugunsten der Wasserkühlung. Es gab zahlreiche Gründe für diese Änderung. Die am häufigsten erwähnten waren die Gefahr des Leckwerdens der Leitungen für Hochdruckgasströme, die radioaktive Verunreinigungen mit sich führten, die Schwierigkeit, schnell große Gebläse zu bekommen, die große Menge des benötigten Heliums, die Schwierigkeit, das Uranium in das Aggregat zu laden und daraus zu entfernen und die relativ geringe Energieausbeute pro Kilogramm des Uraniummetalls. Diese Überlegungen mußten abgewogen werden mit den besonderen Nachteilen der Wasserkühlung, insbesondere der größeren Komplexität der Einheit und den Gefahren der Korrosion.

7.17. Wie so manche Entscheidung bei diesem Projekt, mußte auch diese Wahl zwischen verschiedenen Typen der Anlage auf ungenügender wissenschaftlicher Grundlage getroffen werden. Die Unterlagen sind jetzt noch unvollständig, aber man ist allgemein der Ansicht, daß die Entscheidung für Wasserkühlung richtig war.

DIE MIT DER PLANUNG DES PRODUKTIONSWERKES VERBUNDENEN PROBLEME

SPEZIFIZIERUNG DES ALLGEMEINEN PROBLEMS

7.18. Im II. Kapitel dieses Berichtes versuchten wir das allgemeine Problem des Uranium-Projektes zu definieren, wie es sich im Sommer 1940 bot. Jetzt wollen wir versuchen, eine präzise Definition der Aufgabe zu geben, eine

Großerzeugungsanlage für die Plutoniumproduktion zu entwerfen. Das Ziel ist bereits durch die Entscheidungen über den Produktionsumfang, die Art der Anlage und den Ort begrenzt. Danach blieb das spezielle Problem: eine wassergekühlte mit Graphitmoderator ausgerüstete Einheit zu bauen oder auch mehrere solche Einheiten, verbunden mit einer Anlage zur chemischen Trennung, um eine bestimmte relativ beträchtliche Menge Plutonium täglich zu erzeugen, und zwar sollte die Anlage bei Hanford liegen am Ufer des Columbiaflusses. Es ist unnötig, hinzuzufügen, daß Schnelligkeit der Konstruktion und tatkräftige Ausführung an erster Stelle der Überlegungen standen.

Die Art des Gitters

7.19. Die Gitteranordnungen, die wir bis jetzt beschrieben haben, bestanden in Uraniumbrocken, die in den Graphitmoderator eingebettet waren. Gegen diese Art von Gitter zu Produktionszwecken gab es zwei Einwände: Zunächst ist es hiebei schwer, das Uranium ohne Demontierung der Einheit herauszunehmen; ferner ist es schwer, den Kühlstrom an den Uraniumbrocken zu konzentrieren, die ja die Orte höchster Wärmeerzeugung sind. Freilich war ziemlich klar, daß diese beiden Schwierigkeiten dadurch vermieden werden könnten, daß man ein Stabgitter statt eines Punktgitters benutzte, d. h. das Uranium längs durch den Bremsstoff gehenden Geraden statt an Punkten konzentrierte. Es war kaum zweifelhaft, daß ein Stabarrangement hinsichtlich der Struktur und des mechanischen Aufbaues ausgezeichnet sein würde, aber darüber bestanden Zweifel, ob man ein solches Stabgitter so bauen könne, daß der Multiplikationsfaktor k größer als 1 blieb. Daraus entstand ein Problem für die theoretischen und experimentellen Physiker. Die Theoretiker mußten abschätzen, wie die beste räumliche Verteilung und die Durchmesser der Uraniumstäbe gewählt werden müßten. Die Experimentalphysiker mußten «Exponentialexperimente» mit dieser Gitterart durchführen, um die Schlüsse der Theoretikergruppe nachzuprüfen.

Füllung und Leerung

7.20. Seit die Idee einer zylindersymmetrischen Anordnung akzeptiert war, war es klar, daß die Einheit ohne Demontierung

gefüllt und entleert werden konnte. Denn es war möglich, das Uran aus den zylindrischen Kanälen im Graphitmoderator auszustoßen und neues Uran einzuführen. Dagegen mußte entschieden werden, ob das Uran in langen Stäben benützt werden sollte, was vom kernphysikalischen Standpunkt aus Vorteile bot, oder ob relativ kurze zylindrische Stücke besser seien, weil sie Vorteile vom Standpunkt der bequemen Handhabung bieten. In jedem Falle mußte das Material so hochgradig radioaktiv werden, daß die Entleerung von einem entfernten Führerstand aus geschehen mußte, und das herausgenommene Uran mußte von einem durch Abschirmschilder geschützten entfernten Führerstand aus manipuliert werden.

In Frage kommende Materialien
Korrosionsgefahr

7.21. Wenn Wasser als Kühlmittel benützt wurde, dann mußte es an die Stellen der Erhitzung auf irgendeine Weise durch Kanäle hingeleitet werden. Da Graphitröhren nicht praktisch waren, mußte man sich nach einer andern Art von Röhren umsehen, aber die Möglichkeiten für das Material der Röhren ähnlich wie die Möglichkeiten für alle Materialien in der Einheit waren begrenzt durch kernphysikalische Überlegungen. Die Röhren mußten aus einem Material bestehen, dessen Absorptionswirkungsquerschnitt für Neutronen nicht so groß war, daß der Wert von k unter 1 fiel. Ferner mußten die Röhren aus Material bestehen, das sich unter der hohen Dichte der Neutronen- und Gammabestrahlung in der Erzeugungseinheit nicht zersetzte. Schließlich mußte das Material alle gewöhnlichen Bedingungen eines Kühlröhrensystems befriedigen: nicht leck werden, nicht korrodiert werden und sich nicht verziehen.

7.22. Vom Standpunkt der Kernphysik gab es sieben in Frage kommende Materialien (Pb, Bi, Be, Al, Mg, Zn, Sn). Keines davon hat einen hohen Neutronenabsorptionsquerschnitt. Be-Röhren gab es nicht, und von den andern Materialien schien nur Al vom Standpunkt der Korrosion aus möglich. Aber es war keineswegs sicher, daß Al befriedigen würde, und die Zweifel über die Korrosion der Al-Röhren wurden nicht eher zerstreut, als bis die Anlage tatsächlich einige Zeit gearbeitet hatte.

7.23. Während die Materialwahl für die Röhren recht schwer war, mußten ähnliche Entscheidungen, und zwar mit Rücksicht auf kernphysikalische Eigenschaften und Strahlungsresistenz für alle andern Stoffe getroffen werden, die man für die Einheiten brauchte. So mußten z. B. die elektrischen Isolationsmaterialien, die man für alle in die Einheit eingebrachten Meßinstrumente benützte, strahlungsresistent sein. In bestimmten Zeitpunkten, wenn Kontrollen oder Stichproben gemacht und der Erzeugungseinheit entnommen werden mußten, hatte man mit der Wahrscheinlichkeit zu rechnen, daß die Stichproben hochgradig radioaktiv seien als Resultat ihrer Exposition in der Einheit, und daß der Grad dieser Radioaktivität von dem Material der Proben selbst abhänge.

7.24. Schließlich wußte man nicht, welchen Einfluß die Strahlungsfelder in der Einheit auf Graphit und Uran ausüben würden. Erst später wurde gefunden, daß der elektrische Widerstand, die Elastizität und die Wärmeleitfähigkeit des Graphits sich unter der intensiven Neutronenbestrahlung ändern.

Schutz des Urans vor Korrosion

7.25. Die stärkste Kühlwirkung hätte man erreichen können durch einen Wasserstrom in direktem Kontakt mit dem Uran, in welchem die Hitze entsteht. Aber es gab Anzeichen dafür, daß dieser Weg nicht in Frage kam, denn das Uran würde chemisch mit dem Wasser reagiert haben, mindestens in einem genügenden Ausmaß, um eine gefährliche Radioaktivität der Lösung entstehen zu lassen, möglicherweise bis zu dem Grad, daß die Uranklötze sich auflösten. Folglich mußte man eine Methode finden, das Uran vor der direkten Berührung mit dem Wasser zu schützen. Zwei Möglichkeiten wurden in Betracht gezogen. Die eine war eine Art von Überziehen entweder mit einem elektrolytischen Überzug oder durch Eintauchen, die andere bestand darin, die Uranklötze in eine Art von Schutzjacke oder Büchse einzuschließen. Seltsam genug. Dieses Problem des Einbüchsens stellte sich als eines der schwierigsten Probleme heraus, die von solchen Erzeugungseinheiten überhaupt aufgegeben wurden.

WASSERVERSORGUNG

7.26. Das Problem, Tausende von kWh von Energie wegzuschaffen, ist keineswegs geringfügig. Wieviel Wasser man brauchen würde, das hing natürlich einmal davon ab, welche maximale Temperatur man dem Wasser ohne Gefahr geben konnte, ferner von der maximalen Einströmtemperatur des Wassers des Columbiaflusses; sicherlich war der Bedarf an Wasser vergleichbar dem einer mittelgroßen Stadt. Man mußte also Pumpstationen, Filtrieranlagen und andere Anlagen vorsehen. Außerdem mußte das ganze System höchst zuverlässig sein. Dazu bedurfte es schnell wirkender Steuerungen, mit Hilfe deren die Kernreaktionseinheit sofort stillgestellt werden konnte, im Falle die Wasserzufuhr versagte. Entschloß man sich, ein System mit einmaligem Durchlauf des Kühlwassers anstatt einer mehrfachen Umlaufskühlung zu benutzen, so war ein Speicherungsbassin einzurichten, damit die in dem Wasser induzierte Radioaktivität erlöschen konnte, bevor das Wasser in den Fluß zurückgeleitet wurde. Die Menge des ausströmenden Wassers war so groß, daß die Probleme der Radioaktivität wichtig wurden und folglich die Minimalzeit bestimmt werden mußte, während welcher man das Wasser aus Sicherheitsgründen zurückhalten mußte.

REGULIERUNG UND INSTRUMENTIERUNG

7.27. Das Problem der Kontrolle war sehr ähnlich dem, das wir in Verbindung mit der ersten Kettenreaktionseinheit besprochen haben, ausgenommen, daß nun jedes Ding größeres Ausmaß hatte und infolgedessen eine höhere Gefahr in sich schloß. Es stellte sich als notwendig heraus, automatische Regulatoren vorzusehen, die ein bestimmtes Energieniveau der Einheit aufrecht erhielten. Solche Regulatoren mußten mit Instrumenten in der Erzeugungseinheit verbunden sein, um die Neutronendichte oder andere Merkmale des Energieniveaus zu messen. Ferner mußte man Regulatoren für Notfälle haben, die sofort eingriffen, wenn das Energieniveau Anzeichen raschen Wachstums aufwies oder wenn irgendeine Unterbrechung im Wasserzustrom eintrat. Es war höchst wünschenswert, Mittel anzuwenden, um Schwierigkeiten, wie Verstopfen einer einzelnen Wasserröhre

oder Bruch in der Umhüllung eines Uranbrockens, im Beginn anzuzeigen. Alle diese Regulierungen und Instrumente mußten hinter dicken Schutzwänden, wie oben beschrieben, bedient werden.

Abschirmen

7.28. Wie wir bereits mehrfach erwähnten, ist die von einer im Betriebe befindlichen Hochleistungseinheit ausgehende Strahlung so stark, daß es für das dabei beschäftigte Personal ganz unmöglich ist, sich der Einheit zu nähern. Außerdem hat diese Strahlung, insbesondere die Neutronenstrahlung, eine ausgesprochene Fähigkeit, durch Löcher oder Risse in den Barrieren auszutreten. Infolgedessen muß die ganze energieerzeugende Einheit in einen dicken Wall aus Beton-Stahl oder einem anderen absorbierenden Material eingeschlossen werden. Gleichzeitig aber muß es möglich bleiben, die Einheit durch diese Schutzwälle hindurch zu füllen und zu entleeren, das Wasser hinein- und herauszuleiten. Die Schutzwälle sollten nicht nur strahlendicht, sondern auch luftdicht sein, weil die in der Erzeugungs-Einheit der Strahlung ausgesetzte Luft auch radioaktiv wird.

7.29. Die Strahlungsgefahren, gegen die man Schutzschirme in der Einheit vorkehren muß, erstrecken sich auch über einen großen Teil der Trennungsanlage. Da die Spaltprodukte, die mit der Plutoniumproduktion verknüpft sind, hochgradig radioaktiv sind, muß auch das aus der Einheit herausgenommene Uran von einem entfernten Führerstand hinter Abschirmungen gehandhabt werden, und es muß außerdem während des Transportes zur Trennanlage abgeschirmt werden. Alle Stationen der Trennanlage, einschließlich der Analysen, müssen ebenfalls von entfernten und abgeschirmten Kontrollräumen her bedient werden bis zu dem Punkt, wo das Plutonium relativ frei von radioaktiven Spaltprodukten ist.

Betriebsdurchführung

7.30. Dieses Problem stellt sich sehr einfach. Es konnte keinerlei kontinuierliche Betriebsführung innerhalb der Abschirmung oder der Produktionseinheit geben, wenn diese Einheit einmal tätig war. In etwas geringerem Grade gilt das auch

für die Trennanlage, bei der es wahrscheinlich war, daß sich eine Betriebsstillegung für die Bedienung der Anlage durchführen ließ, vorausgesetzt natürlich, daß passende von der Distanz aus geführte Reinigungsprozesse zur Verringerung der Strahlungsintensität bis unter den Gefahrenspiegel für das Personal durchgeführt werden konnten. Das Problem der Betriebsdurchführung der Nebenanlagen war normal, ausgenommen die ungemein hohe Wichtigkeit einer starken und breiten Pump- und Kraftanlage, um plötzliche Zusammenbrüche des Kühlsystems zu verhindern.

Zeitplan für Füllung und Leerung

7.31. Offenbar wächst die Plutoniummenge in einer ungestört arbeitenden Einheit mit der Zeitdauer ihrer Tätigkeit. Da Pu-239 selbst Spaltungen unterliegt, wirkt seine Bildung im Sinne der Aufrechterhaltung der Kernreaktionen, während das stufenweise Verschwinden von U-235 und das Auftreten der Spaltprodukte mit hohen Absorptionswirkungsquerschnitten für Neutronen die Tendenz hat, die Reaktion abzustoppen. Die Bestimmung darüber, wann eine Erzeugungseinheit stillgestellt und das Pu extrahiert werden soll, schließt eine sorgfältige Abgleichung dieser Faktoren hinsichtlich der Zeitpläne, Materialkosten, Wirksamkeit des Trennprozesses usw. ein. Genau gesagt, betrifft dieses Problem mehr die Betriebsweise als die Planung der Anlage, aber ein wenig hatte man auch bei der Planung daran zu denken, den Zufluß der Uranbrocken zur Einheit und von der Einheit weg zur Trennanlage vorzubereiten.

Die Grösse der Einheiten

7.32. Wir haben die Produktionskapazität der Anlage nur mit Rücksicht auf den gesamten Produktionsumfang besprochen. Natürlich kann an sich eine bestimmte Produktion in einer einzelnen großen Einheit oder in einer Mehrzahl kleinerer Einheiten durchgeführt werden. Der Hauptvorteil für kleinere Einheiten besteht in der kürzeren Konstruktionszeit der ersten Einheit, der Möglichkeit, für die folgenden Einheiten Änderungen vorzusehen und, das ist wohl am wichtigsten, in der Unwahrscheinlichkeit, daß alle Einheiten auf einmal zusammenbrechen. Der Nachteil

kleiner Einheiten besteht darin, daß sie unverhältnismäßig große Mengen von Uran, Bremsstoff usw. nötig haben. Es gibt tatsächlich eine günstigste sozusagen natürliche Größe für die Einheit, und man kann sie durch theoretische Überlegungen annähernd bestimmen.

Allgemeiner Charakter der Trennanlage

7.33. Wie wir schon auseinandergesetzt haben, sind die aus der Produktionseinheit kommenden Stoffmengen hochgradig radioaktiv und müssen infolgedessen von entfernten und abgeschirmten Räumen aus behandelt werden. Das allgemeine Schema hiefür wurde im zweiten Halbjahr 1942 vorgeschlagen, speziell in Verbindung mit den Plänen für die Clinton-Separationsanlage. Dieses Schema bildete ein «Canyon»[1]. Es besteht aus einer Serie von Räumen mit schweren Betonwällen, in einer Reihe hintereinander errichtet, und beinahe ganz eingegraben. Jeder Raum enthält die notwendigen Lösungs- oder Niederschlagsbehälter oder Zentrifugen. Die Stoffbrocken kommen in einen Raum an einem Ende des Canyon. Dort werden sie aufgelöst und passieren die verschiedenen Stufen: Lösung, Fällung, Oxydation oder Reduktion. Sie werden von einem Raum in den nächsten gepumpt, bis eine von Uran und Spaltpartikeln reine Plutoniumlösung schließlich dem letzten Raum entnommen werden kann. Wie bei den Erzeugungseinheiten muß auch hier jeder Prozeß von entfernten Kontrollräumen über der Erde aus geleitet werden, aber diese Leitung ist viel komplizierter als bei den Erzeugungseinheiten. Immerhin war die allgemeine Art dieser Prozesse, soweit es sich um chemische Prozesse handelte, nicht so weit entfernt von der gewöhnlichen und ihnen vertrauten Tätigkeit der damit beauftragten Chemiker.

Kontroll-Analysen

7.34. In den ersten Stufen des Trennprozesses mußten die laufenden Analysen der Proben zur Prüfung der verschiedenen

[1] Canyon ist die englische Schreibweise für Cañon (spanisches Wort = Röhre) und bezeichnet tiefeingeschnittene rinnenartige Täler, wie sie sich besonders eindrucksvoll in Colorado finden. Ein deutsches Wort dafür dürfte es wohl nicht geben. Am nächsten kommt wohl das deutsche Wort Schlucht.

chemischen Prozesse auch von entfernten Kontrollstationen aus durchgeführt werden. Aber sie wurden immerhin dadurch erleichtert, daß man Radioaktivitätsmessungen neben den üblichen chemischen Analysen anwenden konnte.

Abfall-Beseitigung

7.35. Das Rohmaterial (Uran) ist nicht gefährlich radioaktiv. Das erstrebte Produkt (Plutonium) gibt keine durchdringende Strahlung, aber die Kombination seiner α-Aktivität und seiner chemischen Eigenschaften macht es zu einer der gefährlichsten Substanzen, die man überhaupt kennt, wenn es einmal in den Körper gelangt. Immerhin sind die Spaltprodukte, d. h. die größeren Fragmente, in die Uran bei seiner Spaltung aufsplittert, die lästigsten Materialien. Die Spaltprodukte sind sehr stark radioaktiv und bestehen aus einigen 30 Elementen. Darunter befindet sich radioaktives Xenon und radioaktives Jod. Sie werden in einer beträchtlichen Menge frei, wenn die Uranbrocken gelöst werden, und müssen mit besonderer Sorgfalt behandelt werden. Hohe Kamine müssen errichtet werden, die diese Gase mit den Säuredämpfen der ersten Lösungseinheit wegschaffen, und es muß dafür gesorgt werden, daß die Mischung der radioaktiven Gase mit der Atmosphäre das umliegende Land nicht gefährdet. (Wie bei allen andern Gesundheitsfragen wurden die Zulässigkeitsstandards so rigoros festgesetzt und angewandt, daß auch nicht die geringste Wahrscheinlichkeit für eine Gefahr der Gegend oder des Arbeitspersonals sich ergab.)

7.36. Die meisten der andern Spaltprodukte können in der Lösung zurückgehalten werden, müssen aber schließlich beseitigt werden. Man mußte natürlich eine Verunreinigung des benachbarten Flusses in Betracht ziehen. (Tatsächlich wurden die Sicherheitsstandards für Flußverunreinigung so rigoros festgesetzt und eingehalten, daß weder die Bevölkerung noch die Fische im Flusse irgendwie gefährdet werden.)

Rückgewinnung des Urans

7.37. Selbst wenn das Uran in der Lagerungseinheit so lange belassen wurde, bis alles Uran-235 aufgespalten war, mußte of-

fenbar noch ein großer Betrag von Uran-238, das nicht in Plutonium verwandelt war, übrigbleiben. In Wirklichkeit wurde der Prozeß längst vor dieser Stufe abgestoppt. Uran ist ein teures Material, und die gesamte mögliche Versorgung damit ist ernsthaft beschränkt. Infolgedessen mußte die Möglichkeit der Rückgewinnung nach der Abtrennung des Plutoniums in Betracht gezogen werden. Ursprünglich hatte man keinen Plan für die Rückgewinnung, sondern hauptsächlich die Absicht, die Uranlösung zu speichern. Später wurden Wiedergewinnungsanlagen in großem Maßstabe entwickelt.

Korrosion in der Trennanlage

7.38. Eine ungewohnte Eigenart der betreffenden chemischen Prozesse war, daß sie unter einer sehr intensiven Strahlungseinwirkung abliefen. Infolgedessen wurden die benutzten Behälter schneller korrodiert, als es unter gewöhnlichen Umständen der Fall ist. Überdies war jede solche Korrosion eine ernsthafte Angelegenheit wegen der Schwierigkeit, an sie heranzukommen. Lange Zeit fehlte es stark an Kenntnissen über diese Gefahren.

Wirkung der Strahlung auf die chemischen Reaktionen

7.39. Die chemischen Reaktionen für den Extraktionsprozeß wurden natürlich im Laboratorium geprüft, aber sie konnten weder mit einem erheblichen Aufwand von Plutonium noch unter der Einwirkung einer Strahlung, die auch nur annähernd mit der zu erwartenden Strahlungsintensität verglichen werden konnte, untersucht werden. Infolgedessen wurde festgestellt, daß ein Prozeß, der im Laboratorium als erfolgreich befunden wurde, möglicherweise in der Betriebsanlage nicht gehe.

Wahl des Prozesses

7.40. Die eben gegebene Beschreibung über die Vorgänge in den aufeinanderfolgenden Kammern des Canyon war recht unbestimmt. Das konnte nicht anders sein, denn noch im Januar 1943 war keine Entscheidung getroffen, welcher Prozeß für die Extraktion und die Reinigung des Plutoniums in Anwendung kommen sollte. Das Hauptproblem der chemischen Abteilung des M. L. war die Wahl des besten Prozesses für die Anlage.

Das Gesundheitsproblem

7.41. Man erwartete außer Gefahren, die gewöhnlich während der Konstruktion und des Betriebes einer großen chemischen Anlage bestehen, noch andere von einer neuen Art. Zwei Arten der Strahlungsgefahr wurden vorausgesehen — die in der Erzeugungseinheit entstehenden Neutronen und die von den Produkten der Einheit abgegebenen α- und β-Partikel und γ-Strahlen. Obwohl man schon festgestellt hatte, daß die allgemeinen Wirkungen dieser Strahlung ähnlich denen der Röntgenstrahlen seien, stand doch nur eine geringe Einzelerfahrung zur Verfügung. Die Beträge radioaktiver Stoffe, mit denen man fertig werden mußte, waren offensichtlich vielmal größer als die, welche früher in Frage gekommen waren.

7.42. Die Gesundheitsgruppe hatte drei Programme vorzubereiten: 1. Vorsorge für Instrumente und klinische Prüfungen, um jede Andeutung einer gefährlichen Beeinflußung des Personals durch Strahlen zu entdecken, 2. Untersuchungen über die Wirkungen der Strahlung auf Personen, Instrumente usw., und 3. Schätzungen über die Abschirmungs- und Sicherheitsmaßnahmen, die den Vorbereitungen und dem Operationsplan der Anlage einzugliedern waren.

Die Eigenschaften des Plutoniums

7.43. Obwohl man sich damals in ein großes Unternehmen zur Erzeugung von Plutonium einließ, hatte man weniger als 1 mgr zu Studienzwecken zur Verfügung und hatte noch wenig Bekanntschaft mit seinen Eigenschaften. Infolgedessen blieb das Studium des Plutoniums ein Hauptproblem des M. L.

SCHULUNG DES BEDIENUNGSPERSONALS

7.44. Offenbar erforderte der Betrieb einer vollen Produktionsanlage des geplanten Typus einen großen und gut eingeübten Stab von Personal. Obwohl die du Pont Co. einen gewaltigen Fonds an Erfahrung in der Handhabung der verschiedenen Arten chemischer Betriebe besaß, handelte es sich dieses Mal um etwas Neues. Und es war klar, daß das Personal besonders geschult

werden mußte. Diese Schulung wurde zum Teil in Chicago und seiner Umgebung, hauptsächlich aber in den Clinton-Laboratorien durchgeführt.

NOTWENDIGKEIT WEITERER INFORMATIONEN

7.45. In den vorangegangenen Paragraphen sind die Probleme skizziert worden, denen die mit Planung und Erbauung der Plutoniumerzeugungsanlage betraute Gruppe gegenüberstand. In Kapitel VI wurde ein Überblick über den Fortschritt auf diesem Gebiet bis zum Ende des Jahres 1942 gegeben. Im vorliegenden Kapitel wurde überall klargelegt, daß viel mehr Unterlagen notwendig waren, um den Erfolg der Anlage zu sichern. Die Antworten, die man auf die meisten der Fragen erhalten hatte, waren nur vorläufiger Natur. Folglich war es notwendig, gleichzeitig mit Planung und Aufbau auch die Forschung weiterzutreiben.

DAS FORSCHUNGSPROGRAMM

7.46. Um das Bedürfnis nach weiterer Information zu befriedigen, wurden Forschungsprogramme für das Metallurgical Laboratory und das Clinton Laboratory aufgestellt. Der folgende Passus ist ein Auszug aus dem 1943er Programm des «metallurgischen Projektes»:

«*Studien über die Erzeugung der Produkte.* Diese Studien schließen alle Gesichtspunkte der Erforschung, Entwicklung und der vorbereitenden Arbeiten zur Planung, Konstruktion und zum Betrieb der Kettenreaktionseinheiten für die Erzeugung von Plutonium und anderen Materialien ein.

Charakteristik der Erzeugungseinheiten. Theoretische Studien und Experimente über die Gitterstruktur, um den Zustand in Erzeugungseinheiten von hohem Energieniveau voraussagen zu können, wie z. B. Temperatur- und barometrische Effekte, charakteristische Eigenschaften der Neutronen, «Vergiftung» der Erzeugungseinheit usw.

Regelung der Reaktionseinheiten. Entwurf und experimentelle Unterlagen für die Anordnungen, die Geschwindigkeit der Reaktion in den Einheiten zu regeln.

Kühlung der Reaktionseinheiten. Physikalische Studien des Kühlmaterials, technische Probleme der Zirkulation, Korrosion, Erosion usw.

Instrumentierung. Entwicklung von Instrumenten und der Technik, um die Einheit zu beherrschen und die Strahlung im gesamten Terrain der Anlage zu überwachen.

Schutz. Abschirmung, biologische Effekte der Strahlung in der Einheit und klinische Effekte, die mit dem Arbeiten an der Einheit verknüpft sind.

Materialien. Studium der physikalischen (mechanischen und Kerneigenschaften) Eigenschaften der Konstruktionsmaterialien und der Betriebsstoffe, die beim Aufbau und dem Betrieb der Einheit benutzt werden.

Untersuchung über die Radioaktivierung. Erzeugung von zu Experimentalzwecken genügenden Beträgen radioaktiver Stoffe im Cyclotron und in den Einheiten und Untersuchung der Radioaktivierung der Stoffe durch Neutronen, Protonen, Elektronen, Gammastrahlen usw.

Betrieb der Einheiten. Studien über die Verfahren zum Betrieb der Einheit wie die Handhabung des Materials, die Bedienung der Instrumente usw.

Verfahrensplanung. Studien über die Möglichkeit von Produktionsprozessen im ganzen als Anleitung zu einzelnen Arbeiten in anderen Kategorien.

«*Rückgewinnungsstudien.* Diese schließen alle Gesichtspunkte des Unternehmens ein, die für die Entwicklung der Verfahren zur Extraktion des Plutoniums und möglicher Nebenprodukte aus dem Material der Einheit und für ihre Überführung in höhere Reinheitsgrade notwendig sind. Die Hauptanstrengung im «metallurgischen Laboratorium» wird auf einen Einzelprozeß, der am 1. Juni 1943 für die Plutoniumerzeugung ausgewählt werden soll, gerichtet sein. Aber auch die Studien anderer Alternativmöglichkeiten sollen fortgesetzt werden, sowohl im «metallurgischen Laboratorium» als auch in Clinton mit jeder überhaupt verfügbaren Mitarbeiterschaft.

Trennung. Prozesse zur Lösung des Uraniums, Extraktion des Plutoniums und Reinigung durch Entfernung der Spaltprodukte.

Konzentrierung, Reinigung und Reduzierung der Produkte. Prozesse, die zur Erzeugung von Plutonium als reinem Metall führen und Studien über die Eigenschaften des Plutoniums, die zu seiner Erzeugung notwendig sind.

Abfälle. Beseitigung und Methoden zur Wiedergewinnung der Spaltprodukte und der Metalle aus den Abfällen.

Instrumentierung. Entwicklung und Überprüfung von Instrumenten, um die chemischen Prozesse zu beherrschen und die Strahlung allenthalben auf dem Gelände zu überwachen.

Schutz. Abschirmstudien, Bestimmung der biologischen Wirkungen von radioaktiven Staubteilchen, Flüssigkeiten, Festkörpern und anderen Nebenerzeugnissen, und Schutzmaßnahmen.

Materialien. Korrosion des Ausrüstungsmaterials und Strahlungsfestigkeit. Notwendiger Reinheitsgrad und Reinheitsanalysen der Verfahrensmaterialien usw.

Wiedergewinnung des radioaktivierten Materials. Entwicklung der Methoden und tatsächliche Wiedergewinnung des aktivierten Materials (von Leuchtspurmaterial usw.) aus dem Cyclotron und desjenigen, das in den Einheiten aktiviert wurde.

Betriebsstudien. Erprobung der Ausrüstung, Prozeßregelung, Handhabung des Materials usw.

Verfahrensplanung. Studien über Wiedergewinnungsprozesse im ganzen («nasse» Prozesse, Prozesse in Lösung, physikalische Methoden), die zu Einzelarbeit in andern Kategorien führen.

«*Fundamentaluntersuchungen.* Studien über die fundamentalen, physikalischen, chemischen und biologischen Erscheinungen, die in einer Kettenreaktionseinheit vorkommen, und über die Grundeigenschaften aller damit verknüpften Materialien. Obwohl in Clinton der Hauptakzent auf dem Niveau eines Probebetriebs lag, werden viele Fundamentaluntersuchungen die dortigen Bedingungen erfordern (hohe radioaktive Intensität, Prozesse großen Umfangs).

Kernphysik. Grundeigenschaften der Kernspaltung wie Spaltungswirkungsquerschnitt, Neutronenausbeute, Arten der

Spaltungsprodukte usw. Andere für den Prozeß wichtige Kerneigenschaften wie Wirkungsquerschnitte, Eigenschaften der Bremsstoffe, Wirkung der Neutronen auf die Materialien usw.

Allgemeine Physik. Untersuchungen über die grundlegenden Instrumente (elektrische, Ionisations- und optische Geräte), Bestimmungen der Atommasse, Studien über Neutronen, Alpha-, Beta- und Gammastrahlung, Röntgenstrahlenuntersuchungen usw.

Chemie der Strahlung. Strahlenwirkungen auf chemische Prozesse und chemische Reaktionen auf Bestrahlung.

Kernchemie. Die Bahnen der Spaltprodukte, die Abbaukonstanten, Ketten, Erforschung der für das Projekt möglicherweise in Frage kommenden Kerne.

Chemie der Produkte. Chemische Eigenschaften der verschiedenen Produkte und grundlegende Studien über Trennung und Reinigung der Produkte.

Allgemeine Chemie. Chemie der Ausgangsmaterialien und der mit dem Prozeß verknüpften Materialien einschließlich Nebenprodukten.

Allgemeine Biologie. Grundstudien über die Strahlungseffekte auf lebende Materie, Stoffwechsel der wichtigen Materialien usw.

Klinische Untersuchungen. Grunduntersuchungen, wie solche des Blutes, der Pathologie usw.

Metallurgische Studien. Eigenschaften von Uran, Plutonium, Beryllium usw.

Ingenieurstudien. Grundphänomene der Korrosion und ähnliche Studien, die für die Fortführung der technischen Entwicklung der Prozesse wesentlich sind.»

7.47. Eine Überprüfung dieses Programms gibt eine Idee von dem großen Umfang der Forschungen, die als geeignet betrachtet wurden, wichtige Aufklärung zu geben. Viele von den hier aufgezählten Punkten waren nicht spezifische Forschungsprobleme, die man mit einem kleinen wissenschaftlichen Stab in wenig Monaten lösen kann, sondern waren ganze Forschungsgebiete, zu deren erfolgreichem Studium Jahre nötig sind. Es war notwendig, die spezifischen Probleme auszulesen, die am unmit-

telbarsten nützliche Resultate liefern konnten. Aber zu gleicher Zeit war es erwünscht, zu versuchen, die allgemeinen Prinzipien aufzudecken. So war z. B. die Wirkung der Strahlung auf die Eigenschaften der Materialien («Strahlungsfestigkeit») im wesentlichen ganz unbekannt. Es war notwendig, sowohl empirische Überprüfungen der einzelnen für die Einheit in Frage kommenden Materialien anzustellen, als auch allgemeine Theorien von den beobachteten Wirkungen zu ersinnen. Jede Anstrengung wurde gemacht, um die ganze Tätigkeit auf das Hauptziel abzustellen: eine erfolgreiche Produktionsanlage.

ORGANISATION DES PROJEKTES

7.48. Mancherlei Änderungen in der Organisation und im Personalbestand des Unternehmens fanden statt. Während des größten Teils der Aufbauzeit in Clinton und Hanford war *A. H. Compton* Direktor des «metallurgischen Projekts»; *S. K. Allison* war Direktor des «metallurgischen Laboratoriums» in Chicago und *M. D. Whitaker* war Direktor des Clinton-Laboratoriums. Die Chicago-Gruppe war in vier Abteilungen organisiert: Physik, Chemie, Technologie und Gesundheitswesen. Später teilte man die Physikabteilung in zwei Gruppen: allgemeine Physik und Kernphysik. *R. L. Doan* war Forschungsdirektor in Clinton, dagegen gab es in Chicago keine damit korrespondierende Stellung. Unter andern Persönlichkeiten, die beigeordnete Direktoren, oder «Assistant»-Direktoren der Laboratorien, oder Planungsdirektoren, oder Abteilungsdirektoren waren, seien genannt: *S. T. Cantril, C. M. Cooper, F. Daniels, A. J. Dempster, E. Fermi, J. Franck, N. Hilberry, T. R. Hogness, W. C. Johnson, H. D. Smyth, J. C. Stearns, R. S. Stone, H. C. Vernon, W. W. Watson* und *E. Wigner*. Anfang 1943 wirkte *C. H. Thomas* von der Monsanto Chemical Company als Vorsitzender eines Komitees für Chemie und Metallurgie des Plutoniums. Dieses Komitee verband die Tätigkeit des Metallurgical Laboratory mit der von Los Alamos (vergleiche Kapiel XII) und von anderen Orten. Später führte die Monsanto Chemical Company einige Arbeiten über wichtige Spezialprobleme durch, die in Verbindung mit dem Los Alamos-Werk auftauchten.

7.49. Diese Leute hatten die Verantwortung, darauf zu achten, daß die oben beschriebenen Programme ausgeführt und daß wichtige Ergebnisse an die du Pont Co. berichtet wurden. Ebenso waren sie verantwortlich für die Beantwortung von Fragen, die bei der du Pont Co. auftauchten, und für die Billigung oder Kritik der Pläne, die die du Pont Co. vorlegte.

ZUSAMMENARBEIT ZWISCHEN DEM «METALLURGICAL LABORATORY» UND DER DU PONT CO.

7.50. Seitdem die du Pont Co. die Planungs- und Durchführungsorganisation und das «metallurgische Laboratorium» die Forschungsorganisation bildeten, lag klar auf der Hand, daß enge Zusammenarbeit wichtig war. Nicht nur, daß die du Pont Co. auf spezielle Anfragen Antwort nötig hatte, ihre Gruppe konnte auch durch Kritik und Vorschläge in den vielen Punkten Nutzen ziehen, in denen die «metallurgische» Gruppe spezielle Kenntnisse hatte. Ebenso konnte die metallurgische Gruppe aus den Kenntnissen Nutzen ziehen, die die du Pont Co. in vielen technischen Fragen der Planung, der Konstruktion und des Betriebs besaß. Um diese Art der Zusammenarbeit zu fördern, setzte die du Pont Co. einen ihrer Physiker, *J. B. Miles,* in Chicago ein, und haben viele andere du Pont-Leute, speziell *C. H. Greenewalt,* einen großen Teil ihrer Zeit in Chicago zugebracht. *Miles* und *Greenewalt* besuchten regelmäßig die Zusammenkünfte des Laboratory Council. Es gab aber kein entsprechendes umgekehrtes Verhältnis, obwohl viele Mitglieder des Laboratoriums zwanglos Wilmington besuchten. Außerdem wurde *J. A. Wheeler* von Chicago nach Wilmington versetzt und wurde Mitglied des du Pont-Stabes. Natürlich gab es einen dauernden Austausch von Berichten und Briefen, und häufige Konferenzen fanden zwischen *Compton* und *R. Williams* von der du Pont Co. statt. *Whitaker* verbrachte viel Zeit in Wilmington während der Periode der Planung und des Aufbaus der Clintonanlage.

ZUSAMMENFASSUNG

7.51. Im Januar 1943 wurde beschlossen, eine Plutoniumproduktionsanlage von großer Leistung aufzubauen. Dies bedeutete

eine Produktionseinheit von Tausenden von Kilowatt und eine chemische Trennanlage zur Extraktion der Produkte. Die du Pont Co. hatte die Anlage zu planen, aufzubauen und zu betreiben. Das «metallurgische Laboratorium» hatte die notwendigen Forschungen zu machen. Als Ort wurde ein Bauplatz in Hanford, Washington, am Columbia-Fluß gewählt. Eine vorläufige Entscheidung, die Anlage mit einer Heliumkühlung aufzubauen, wurde zugunsten der Wasserkühlung geändert. Die Hauptprobleme waren diejenigen, die mit der Gitterstruktur, der Beschikkung und Entleerung, der Materialwahl (besonders mit Rücksicht auf Korrosion und Strahlung), der Wasserversorgung, der Regulierung und Instrumentierung, der Gesundheitsfürsorge, dem chemischen Trennprozeß und der Planung der Trennanlage verknüpft waren. Pläne wurden entworfen für die notwendigen grundlegenden und technischen Forschungen und für die Ausbildung des Personals. Man traf Vereinbarungen für die Verbindung zwischen der du Pont Co. und dem metallurgischen Laboratorium.

VIII. KAPITEL. DAS PLUTONIUM-PROBLEM JANUAR 1943 BIS JUNI 1945

EINFÜHRUNG

8.1. Die Notwendigkeit, Planung und Konstruktion einer Plutonium-Vollproduktionsanlage gleichzeitig mit Forschung und Entwicklung vorwärtszutreiben, führte unvermeidlich zu einem gewissen Maße von Störung und Schädigung der Wirksamkeit. Es wurde wichtig, viele alternative Möglichkeiten der Prozeßführung zu untersuchen. Dazu war es erforderlich, allen denkbaren Ursachen eines Versagens nachzugehen, selbst wenn die Möglichkeit hiefür sehr gering war. Jetzt, wo die Hanford-Anlage erfolgreich Plutonium erzeugt, halten wir es für angebracht, zu sagen, daß ein großer Prozentsatz der Resultate jener Forschung, die man in der Zeit von Ende 1942 bis Ende 1944 durchführte, niemals benutzt werden wird, wenigstens nicht für die ursprünglich ins Auge gefaßten Pläne. Würde die Hanford-Anlage jedoch in Schwierigkeiten geraten sein, dann wäre es möglich gewesen, daß irgendeiner der jetzt überflüssigen Versuche gerade die Auskunft geliefert hätte, die man in diesem Falle benötigte, um den Mißerfolg in einen Erfolg umzuwandeln. Selbst jetzt ist es noch nicht möglich, zu sagen, ob nicht künftige Verbesserungen vielleicht von den Resultaten der Untersuchungen abhängen werden, die heute unwichtig erscheinen.

8.2. Man hat geschätzt, daß 30 Bände notwendig wären, wollte man einen kompletten Bericht der wichtigen wissenschaftlichen Forschungsresultate erstatten, die unter den Auspizien des Metallurgical Projects durchgeführt worden sind. Tatsächlich sind über jeden einzelnen Punkt des Forschungsprogramms, das im letzten Kapitel vorgelegt wurde, Arbeiten durchgeführt worden. Es wäre offensichtlich unmöglich, in dem vorliegenden Bericht mehr als einen kurzen Auszug von all diesen Forschungen zu geben. Wir halten dafür, daß auch dies unbefriedigend wäre und daß es vorzuziehen ist, eine allgemeine Erläuterung über die

Kettenreaktionseinheiten und die Trennungsanlagen, wie sie jetzt in Betrieb sind, zu geben — verbunden mit einigen Erörterungen über die frühere Entwicklung.

DIE KETTENREAKTION IN EINER EINHEIT

8.3. In Kapitel I und anderen vorhergehenden Kapiteln gaben wir eine kurze Darstellung der Spaltprozesse, der Wirkungsweise der Erzeugungseinheit und der chemischen Trennung. Jetzt wollen wir diese Themen von einem etwas verschiedenen Gesichtspunkt aus betrachten, bevor wir die Plutonium-Erzeugungsanlage selbst beschreiben.

8.4. Die Tätigkeit einer Einheit hängt vom Durchgang der Neutronen durch Materie ab und von der Natur der Zusammenstöße der Neutronen mit dem getroffenen Kern. Die wichtigsten Arten der Zusammenstöße sind die folgenden:

I. Zusammenstöße, bei denen die Neutronen gestreut werden und einen beträchtlichen Energieverlust erleiden. a) Unelastische Zusammenstöße schneller Neutronen mit Uraniumkernen; b) elastische Zusammenstöße schneller oder mäßigschneller Neutronen mit leichten Kernen des Bremsmaterials; diese Zusammenstöße dienen dazu, die Neutronenenergie zu sehr geringen Beträgen (den sogenannten thermischen Geschwindigkeiten) herabzusetzen.

II. Zusammenstöße, bei denen die Neutronen absorbiert werden. a) Zusammenstöße, die Kernspaltung herbeiführen und Spaltprodukte und zusätzliche Neutronen liefern. b) Zusammenstöße, die zur Bildung neuer Kerne führen, die in der Folge radioaktiv abbauen (zum Beispiel $_{92}U^{239}$, welches $_{94}Pu^{239}$ liefert).

8.5. Nur die zweite Klasse von Zusammenstößen erfordert weitere Erörterungen. Hinsichtlich der Zusammenstöße des Typus II a) gilt, daß der wichtigste Fall in einer Erzeugungseinheit im Zusammenstoß zwischen Neutronen und U-235 liegt, aber auch die durch hohe Energie herbeigeführte Spaltung von U-238 sowie die auf thermischer Energie des Pu-239 beruhende spielen eine Rolle. Die Zusammenstöße vom Typ II b) sind hauptsächlich solche zwischen Neutronen und U-238. Diese Art von Begegnungen gibt es für Neutronen aller Energien, aber sie ist am wahrscheinlichsten für Neutronen, deren Energie innerhalb eines

Resonanzbezirks liegt, das ist ein Bezirk, der etwas oberhalb der thermischen Energie sich befindet. Die Aufeinanderfolge der Resultate der Kollision vom Typ II b) stellt sich folgendermaßen dar:

$$_{92}U^{238} + {_0n^1} \rightarrow {_{92}U^{239}} + \text{Gamma-Strahlen}$$

$$_{92}U^{239} \xrightarrow[\text{23 Min.}]{} {_{93}Np^{239}} + {_{-1}e^0}$$

$$_{93}Np^{239} \xrightarrow[\text{2—3 Tage}]{} {_{94}Pu^{239}} + {_{-1}e^0} + \text{Gamma-Strahlen}$$

8.6. Alle anderen spaltungslosen Absorptionsprozesse sind hauptsächlich dadurch wichtig, daß sie Neutronen verbrauchen; sie kommen im Bremsstoff vor, im U-235, in der Kühlflüssigkeit, in den ursprünglichen Verunreinigungen, in den Spaltprodukten und sogar im Plutonium selbst.

8.7. Da es das Ziel einer Kettenreaktion ist, Plutonium zu erzeugen, müssen wir bestrebt sein, jeden Überschuß von Neutronen in U-238 zur Absorption zu bringen, so daß gerade genug Neutronen übrigbleiben, um die notwendigen Spaltungen zu erzeugen, mit denen sich die Kettenreaktion aufrecht erhält. Tatsächlich ist die Tendenz der Neutronenabsorption durch das überwiegende Isotop U-238 so groß im Vergleich zur Tendenz, Spaltungen in dem 140mal selteneren U-235 zu erzeugen, daß die Hauptbemühung in der Konstruktion darauf gerichtet sein mußte, die Spaltung zu begünstigen (zum Beispiel durch die Benutzung eines Bremsstoffes, durch eine geeignete Gittergliederung, Materialien von hoher Reinheit usw.), damit die Kettenreaktion aufrechterhalten bleibe.

Lebensgeschichte einer Generation von Neutronen[1]

8.8. Alle von dem Metallurgical Laboratory oder mit seiner Hilfe entworfenen Kettenreaktionseinheiten bestehen aus vier Arten von Material — Uraniummetall, Bremsstoff, Kühlflüssigkeit und Hilfsmaterial, wie Wasserrohre, Uranbehälter, Regulierungsstreifen oder -stäbe, Unreinigkeiten usw. Für alle diese Einheiten hängt die Einleitung der Reaktion davon ab, daß vereinzelte Neutronen von spontanen Spaltungen oder kosmischen Strahlen vorhanden sind.

[1] Siehe Zeichnung auf Seite 55.

8.9. Nehmen wir an, daß die Erzeugungseinheit durch die gleichzeitige Befreiung (in Uraniummetall) von N schnellen Neutronen in Gang gesetzt wird. Die meisten dieser Neutronen haben Anfangsenergien, die höher sind als der Schwellenwert für die U-238-Spaltung. Wenn diese Neutronen nunmehr nach allen Richtungen im Metall und im Bremsstoff wandern, erleiden sie zahlreiche unelastische Zusammenstöße mit dem Uranium und zahlreiche elastische Stöße mit dem Bremsstoff. Alle diese Kollisionen führen dazu, die Energie der Neutronen unter den Schwellenwert herabzusetzen. Im speziellen Fall einer Erzeugungseinheit mit Graphitbremsstoff legt ein Neutron, das vom Uran in den Graphit übertritt, durchschnittlich ungefähr 2,5 cm unter Zusammenstößen zurück und macht durchschnittlich ungefähr 200 elastische Kollisionen, bevor es vom Graphit wieder in das Uran zurückkehrt. Da bei jeder derartigen Kollision das Neutron durchschnittlich $^1/_6$ von seiner Energie[1] verliert, wird die Energie eines Neutrons, das ursprünglich ein Mev hatte, auf thermische Energie (die man gewöhnlich mit 0,025 eV annimmt) abgebremst, mithin beträchtlich früher, als das Neutron einen einzigen Durchgang durch den Graphit beendet. Es gibt natürlich viele Neutronen, die von diesem durchschnittlichen Verlauf abweichen, und es werden genügend Spaltungen durch schnelle Neutronen zustandekommen, um die Anzahl der Neutronen leicht zu erhöhen. Diese Erhöhung kann man in Rechnung stellen, indem man die ursprüngliche Neutronenzahl N mit einem Faktor ε multipliziert; diesem Faktor hat man den Namen «fast-fission effect» (Effekt der schnellen Neutronen) oder «fast-multiplication factor» (Multiplikationsfaktor der schnellen Neutronen) gegeben.

8.10. Da die durchschnittliche Energie der vorhandenen $N\varepsilon$-Neutronen immer weiter abnimmt, werden die unelastischen Zusammenstöße im Uran wichtig, weil die Energiereduktion hauptsächlich im Bremsstoff stattfindet. Jedoch wird die Wahrscheinlichkeit der spaltungslosen Absorption (Resonanzeinfang) in U-238 bedeutend, sobald die Region der «Zwischenergie» oder Resonanzenergie erreicht ist. In Wirklichkeit wird eine ganze

---

[1] Hier liegt im amerikanischen Originaltext ein Versehen vor. Es geht ein Sechstel der Geschwindigkeit (v), nicht der Energie ($^1/_2\,mv^2$) verloren.

Anzahl Neutronen in dieser Energieregion ohne Rücksicht auf die Wahl der Gitterkonstruktion absorbiert werden. Die Wirkung eines solchen Einfangs kann man dadurch ausdrücken, daß man Nε mit einem Faktor p multipliziert (der immer kleiner als 1 ist), und dem man den Namen «resonance escape probability» (Resonanzentweichungswahrscheinlichkeit) gibt. Er bezeichnet die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein gegebenes Neutron, das anfänglich eine Energie oberhalb der Resonanzregion hatte, die thermische Energie erreicht, ohne in U-238 absorbiert zu werden. Auf diese Weise erhalten wir von den ursprünglichen N Neutronen von hoher Energie Nεp Neutronen von thermischer Energie.

8.11. Hat ein Neutron einmal die Stufe der thermischen Energie erreicht, dann ist die Wahrscheinlichkeit, daß es weiterhin durch Zusammenstoß Energie verliert, nicht größer als die, daß es hierbei Energie gewinnt. Infolgedessen werden die Neutronen im Durchschnitt auf dieser Energiestufe bleiben, bis sie absorbiert werden. In dem Bereich der thermischen Energie ist die Wahrscheinlichkeit, daß das Neutron durch Bremsstoff, Kühlflüssigkeit und Hilfsmaterial absorbiert wird, größer als bei höheren Energien. Auf alle Fälle findet man, daß wir nur einen geringfügigen Fehler bei der Berechnung begehen, wenn wir annehmen, daß alle unerwünschte Absorption in diesem Energiebereich stattfindet. Wir führen jetzt einen Faktor f ein, der «thermal utilization factor» (Nutzeffekt der thermischen Neutronen) heißt und der definiert ist als die Wahrscheinlichkeit, daß ein gegebenes thermisches Neutron im Uran absorbiert wird. So haben wir endlich von den ursprünglichen N schnellen Neutronen Nεpf thermische Neutronen bekommen, die durch Uran absorbiert werden.

8.12. Obwohl es mehrere Arten gibt, wie eine normale Mischung von Uranisotopen Neutronen absorbieren kann, möge sich der Leser erinnern, daß wir in einem früheren Kapitel eine Zahl η definiert haben. Diese Größe η bezeichnete die Anzahl der Spaltungsneutronen, die durch ein im Uran absorbiertes thermisches Neutron erzeugt werden, ohne Rücksicht auf die Einzelheiten des Prozesses. Wenn wir daher die Anzahl der im Uran absorbierten thermischen Neutronen Nεpf mit η multiplizieren, so haben wir

die Anzahl der neuen schnellen Neutronen, die von der ursprünglichen Anzahl N schneller Neutronen in deren Lebenslauf erzeugt wurden. Wenn $N\varepsilon pf\eta$ größer als N ist, dann kommt es zu einer Kettenreaktion, und die Anzahl der Neutronen wächst kontinuierlich. Offenbar ist das Produkt $\varepsilon pf\eta = k_\infty$ der Multiplikationsfaktor, den wir im Kapitel IV definiert haben.

8.13. Wir konstatieren, daß wir bis jetzt von den Neutronen, die aus der Erzeugungseinheit entweichen, keine Notiz genommen haben. Diese Unterlassung ist absichtlich erfolgt, weil der oben definierte Wert von k_∞ sich auf eine unendlich große Gitteranordnung bezieht. Aus den bekannten Werten von k_∞ und aus der Tatsache, daß die Erzeugungseinheiten tatsächlich funktionieren, ergibt sich, daß der Prozentsatz der entweichenden Neutronen nicht sehr groß sein kann. Wir sahen in Kapitel II, daß die relative Bedeutung der entweichenden Neutronen mit der wachsenden Größe der Erzeugungseinheit abnimmt. Wenn es also nötig ist, in die Einheit beträchtliche Mengen von Hilfsmaterial, wie Kühlröhren einzubauen, muß man nur die Erzeugungseinheit etwas größer machen, um die gesteigerte Absorption auszugleichen.

8.14. Zusammenfassend läßt sich sagen: Die Einheit funktioniert durch die Überführung schneller Neutronen in Neutronen thermischer Energien mit Hilfe einer Bremsstoff-Gitteranordnung, worauf die Neutronen thermischer Energie im Uran absorbiert werden und Spaltungen erzeugen, die wiederum Neutronen hoher Geschwindigkeit hervorbringen. Die Wiedergewinnung von Neutronen wird etwas unterstützt durch den «fast neutron effect» (die Wirkung schneller Neutronen); sie wird behindert von der Resonanzabsorption während der Energiereduktion durch die Absorption in Graphit und anderen Materialien und durch Entweichen von Neutronen.

Die Wirkungen der Reaktionsprodukte auf den Multiplikationsfaktor

8.15. Selbst bei dem hohen Energieniveau in den Hanforderzeugungseinheiten werden nur einige Gramm U-238 und U-235 pro Tag von den vorhandenen Millionen von Grammen Uran

aufgebraucht. Die Wirkungen dieser Umwandlungen sind gleichwohl sehr beträchtlich. Während das U-235 erschöpft wird, wächst die Konzentration von Plutonium. Zum Glück ist Pu selbst durch thermische Neutronen spaltbar, wodurch eine Tendenz entsteht, die Abnahme von U-235 soweit auszugleichen, daß die Kettenreaktion aufrechterhalten bleibt. Gleichzeitig werden aber andere Spaltprodukte erzeugt. Sie bestehen typisch aus unstabilen und verhältnismäßig unbekannten Kernen, so daß man anfangs nicht voraussagen konnte, in welchem Grad sie den Multiplikationsfaktor nachteilig beeinflussen würden. Man nennt ihre störenden Wirkungen Vergiftung.

DIE REAKTIONSPRODUKTE UND DAS TRENNUNGSPROBLEM

8.16. Es gibt zwei Hauptteile im Plutonium-Erzeugungsprozeß in Hanford: die eigentliche Erzeugung in der Einheit und die Trennung des Plutoniums von den Uranklumpen, in denen es entstand. Wir gehen nun zur Erläuterung des zweiten Teiles, des Separationsprozesses, über.

8.17. Die Uranklumpen enthalten außer Plutonium noch andere Elemente, die aus der Spaltung des U-235 herrühren. Wenn ein U-235-Kern gespalten wird, sendet er ein oder mehrere Neutronen aus und zerplatzt in zwei Bruchstücke von vergleichbarer Größe und einer Gesamtmasse, die 235 oder weniger beträgt. Offenbar ist die Spaltung in genau gleiche Massen selten. Weit häufiger sind Bruchstücke, von denen das eine eine Massenzahl zwischen 134 und 144 und das andere eine solche zwischen 100 und 90 hat. So gibt es zwei Gruppen von Spaltprodukten: eine schwere Gruppe mit Massenzahlen von ungefähr 127 bis 154 und eine leichte Gruppe von ungefähr 115 bis 83. Diese Spaltprodukte sind größtenteils unstabile Isotope der ungefähr 30 bekannten Elemente in diesem allgemeinen Bereich der Massenzahlen. Ihr typischer Abbau durch aufeinander folgende Beta-Emissionen, die von Gamma-Strahlen begleitet sind, führt schließlich zu bekannten stabilen Kernen. Die Halbwertszeiten der verschiedenen Zwischenkerne betragen von Bruchteilen einer Sekunde bis zu einem Jahr und darüber; einige der wichti-

geren unter ihnen haben Halbwertszeiten von der Größenordnung etwa eines Monats. Darunter befinden sich etwa 20 verschiedene Elemente von beträchtlicher Konzentration. Das am stärksten vertretene Element macht etwas weniger als 10 % der ganzen Ansammlung aus.

8.18. In der Erzeugungseinheit sind außer den radioaktiven Spaltprodukten auch U-239 und Np-239 (Zwischenprodukte beim Aufbau des Plutoniums) vorhanden, und auch diese sind radioaktiv. In dem Augenblick, in dem die Erzeugungseinheit ihre Tätigkeit beginnt, fängt die Konzentration aller dieser Produkte zu wachsen an. Schließlich erreicht die Geschwindigkeit des radioaktiven Zerfalls diejenige ihrer Bildung, so daß die Konzentration konstant bleibt. So ist beispielsweise die Anzahl der in der Sekunde erzeugten U-239-Atome konstant bei einer Erzeugungseinheit, die bei einem festen Energieniveau arbeitet. In Einklang mit den Gesetzen des radioaktiven Abbaus ist die Anzahl der in einer Sekunde verschwindenden U-239-Atome proportional der im Augenblick vorhandenen Anzahl dieser Atome, so daß sie während der ersten Minuten oder Stunden nach der Ingangsetzung der Einheit wächst. Aber bald tritt der Zustand ein, daß in jeder Sekunde praktisch ebensoviel Kerne zerfallen, wie in ihr gebildet werden. In ähnlicher Weise wird das Konzentrationsgleichgewicht auch für andere Kerne erreicht. Die Gleichgewichtskonzentration ist proportional der Erzeugungsgeschwindigkeit des neuen Kernes und seiner Halbwertszeit. Produkte, die stabil oder von sehr großer Halbwertszeit sind (wie zum Beispiel Plutonium), werden eine beträchtliche Weile wachsende Konzentration zeigen. Stellt man die Erzeugungseinheit ab, so geht natürlich die Radioaktivität weiter, aber sie nimmt mit kontinuierlich sinkender Geschwindigkeit ab. Isotope von sehr kurzen Halbwertszeiten fallen in wenig Stunden oder Minuten aus; andere von längerer Halbwertszeit bleiben während Tagen oder Monaten erheblich aktiv. Auf diese Weise hängt die Konzentration der verschiedenen Produkte in einer vor kurzem abgestellten Einheit zu jeder gegebenen Zeit ab von der Höhe des Energieniveaus, mit der die Einheit in Betrieb war, von der Zeitdauer ihres Betriebs und von der Zeit, die seit ihrer Abstellung verstrichen ist. Natürlich ist die Konzentration von Plutonium und (nachteiligerweise) die Konzentration

der langlebigen Spaltprodukte um so höher, je länger die Einheit vorher in Betrieb war. Je länger umgekehrt die Kühlperiode, das heißt die Zeit zwischen der Entfernung des Materials aus der Einheit und der chemischen Behandlung ist, desto geringer ist die Intensität der Radioaktivität der Spaltprodukte. Bei diesen Überlegungen, inwieweit lange Arbeitszeiten und Kühlungsintervalle einerseits, oder der Wunsch, das Plutonium rasch zu extrahieren andererseits, vorzuziehen sei, muß man zu einem Kompromis kommen.

8.19. Man kann Tabellen machen, aus denen sich die chemische Konzentration des Plutoniums und der verschiedenen Spaltprodukte als Funktionen des Energieniveaus, der Arbeitsdauer und der Dauer der Kühlzeit ersehen lassen. Die Halbwertszeit des U-239 ist so kurz, daß seine Konzentration schon bald nach dem Abstellen der Einheit vernachlässigt werden kann. Das Neptunium wird ziemlich schnell in Plutonium verwandelt. Selbstverständlich bleibt das Gesamtgewicht der stabilen und unstabilen Spaltprodukte nach der Außerbetriebsetzung einer Einheit praktisch konstant. Bei den Bedingungen, unter denen die Clinton- und die Hanfordanlage arbeiten, ist das Maximum der Plutonium-Konzentration so klein, daß es wesentlich zur Schwierigkeit der chemischen Trennung beiträgt.

DIE WAHL EINES CHEMISCHEN TRENNPROZESSES

8.20. Die Aufgabe besteht also darin, eine chemische Trennung der Tagesrate sagen wir von einigen Gramm Plutonium aus mehreren 1000 Gramm Uran durchzuführen, das durch große Mengen von gefährlichen radioaktiven Spaltungsprodukten, die aus 20 verschiedenen Elementen bestehen, verunreinigt ist. Die Aufgabe wird noch dadurch besonders erschwert, daß die Anforderungen an die Reinheit des Plutoniums wirklich sehr groß sind.

8.21. Man untersuchte vier Arten von chemischen Trennungsverfahren: Flüchtigkeit, Absorption, Lösungsextraktion und Fällung. Die Arbeiten über Absorption und Lösungsextrakte waren ausgedehnt, und derartige Methoden dürften in dem Hauptpro-

zeß oder in der Abfallrückgewinnung wachsende Anwendung finden; jedoch war die Hanfordanlage für die Fällungsmethode angelegt.

8.22. (Fußnote im englischen Text: Die Paragraphen 8.22 bis 8.26 sind Zitate oder Auszüge aus einem allgemeinen Bericht des «Metallurgical Laboratory», der im Frühjahr 1945 vorbereitet wurde.) Das Phänomen der Mit-Fällung, d. h. der Fällung von geringen Konzentrationen eines Elements gemeinsam mit einem «Träger»-Niederschlag eines anderen Elements, war allgemein in der radioaktiven Chemie benutzt worden und wurde auch für die Plutoniumtrennung angewandt. Da die Arbeit über die Chemie des Plutoniums in der ersten Zeit auf winzige Mengen des Elements beschränkt war, machte sie vor allem Gebrauch von Fällungsreaktionen, aus denen Löslichkeitseigenschaften abgeleitet werden konnten. Daher kam es, daß die Fällungsmethoden am weitesten ausgearbeitet waren, als die Konstruktion der Anlage begann. Man war der Ansicht, daß, wenn die verschiedenen Stadien des Trennungsprozesses teilweise durch empirische Annäherung entwickelt werden müßten, das Risiko im Gesamtablauf eines Fällungsprozesses kleiner sein würde als z. B. bei einem, der Reaktionen in fester Phase in sich schließe. Außerdem konnten die Fällungsprozesse, die man damals im Auge hatte, in eine Folge von wiederholten Operationen (Zyklen genannt) aufgeteilt werden, wodurch die Anzahl der verschiedenen Apparateteile, die konstruiert werden mußten, beschränkt wurde und eine beträchtliche Abänderung des Prozesses ohne Änderung der Apparatur möglich war. Während so die zugrunde liegende Konstruktion der Anlage im Hinblick auf eine bestimmte Methode gemacht wurde, führte die endgültige Wahl einer anderen Methode zu keinen Störungen.

8.23. Die meisten Fällungsprozesse, die ernsthaft in Betracht gezogen wurden, machten Gebrauch von einem Übergang zwischen der IV. und VI. Oxydationsstufe des Plutoniums. Solche Prozesse verlangen eine Fällung des Pu (IV) mit einer bestimmten Verbindung als Träger, dann Auflösung des Niederschlags, Oxydation des Plutoniums zur VI. Stufe und Wiederfällung der Trägerverbindung, während das Pu (VI) in Lösung bleibt. Spaltprodukte, die nicht von diesen Verbindungen mitgefällt werden,

bleiben in Lösung, wenn Pu (IV) gefällt wird. Spaltprodukte, die mitgefällt werden, werden aus dem Plutonium in der VI. Stufe entfernt. Man führt aufeinanderfolgende Oxydations-Reduktions-Zyklen aus, bis die gewünschte Reinigung erreicht ist. Der Prozeß der Entfernung der Spaltprodukte wird Reinigung (decontamination) genannt, und der Reinheitsgrad wird geprüft, indem man die Änderung der Radioaktivität des Materials mißt.

Kombinationsprozesse

8.24. Es ist möglich, die verschiedenen Arten von Prozessen zu kombinieren oder zu koppeln. Auf diese Weise kann man einige Vorteile gewinnen, da ein Prozeßtyp einen andern ergänzen kann. Z. B. ein Prozeß, der gute Reinigung ergibt, könnte erfolgreich mit einem andern kombiniert werden, der, obgleich unwirksam für die Reinigung, sehr wirksam für die Trennung vom Uran sein würde.

8.25. Zu dem Zeitpunkt, als es nötig wurde, über den Prozeß zu entscheiden, der als Basis für die Konstruktion der Hanford-Anlage dienen sollte (Juni 1943), wurde die Wahl aus den oben angegebenen Gründen auf Fällungsprozesse beschränkt und lag klar zwischen zwei solchen Prozessen. Der endgültig gewählte Prozeß war in Wirklichkeit aber eine Verbindung der beiden.

8.26. Der Erfolg des Trennungsprozesses in Hanford hat alle Erwartungen übertroffen. Die hohen Ausbeuten und Reinigungsfaktoren und die relative Bequemlichkeit des Betriebes haben die Weisheit der Wahl des Prozesses völlig bewiesen. Diese Wahl fußte auf einer Kenntnis der Chemie des Plutoniums, die von weniger als 1 mg Plutonium gewonnen worden war. Die weitere Entwicklung mag den gegenwärtigen Hanford-Prozeß veralten lassen, aber das Hauptziel, das darin bestand, einen brauchbaren und wirksamen Prozeß zu haben, so bald die Hanford-Einheiten Plutonium lieferten, wurde erreicht.

DAS ARGONNE-LABORATORIUM

8.27. Das Argonne-Laboratorium wurde früh im Jahre 1943 außerhalb Chicagos errichtet. Der Bauplatz, ursprünglich für eine Probeanlage in Aussicht genommen, wurde später als zu nahe an

der Stadt liegend erachtet und für die Wiedererbauung der sogenannten West Stands-Einheit benützt, die ursprünglich auf dem Terrain der Universität von Chicago stand und die sicher ungefährlich war. Diese Einheit hatte unter der Direktion von *Fermi* und seinen Kollegen *H. L. Anderson, W. H. Zinn, G. Weil* und anderen als Mustereinheit zum Studium der thermischen Stabilität, der Regulierung der Instrumente und der Abschirmung gedient, ferner als Neutronenquelle für die Materialprüfung und das Studium der Physik der Neutronen. Außerdem hat sie sich als Trainingsschule für den Werkbetrieb als wertvoll erwiesen. Später wurde dort eine Einheit mit schwerem Wasser (siehe weiter unten) aufgebaut.

8.28. Es ist nicht notwendig, die erste Argonne-Einheit, ein Graphit-Uraniumaufbau, in den Einzelheiten zu beschreiben. Materialien und Gitterstruktur waren fast identisch mit denen, die man für die Originaleinheit West Stand benutzt hatte. Die Konstruktionseinheit bildet einen Würfel. Sie ist umgeben von einer Abschirmung und hat Regulierungs- und Sicherheitsanlagen ähnlich denen, die man später in Clinton benutzte. Sie hat kein Kühlsystem und arbeitet normalerweise auf einem Energieniveau von nur einigen Kilowatt. Gelegentlich lief sie für ganz kurze Dauer auch auf einem hohen Energieniveau. Wenn man in Betracht zieht, daß sie hauptsächlich ein Wiederaufbau der allerersten Kettenreaktionseinheit war, die man überhaupt je errichtet hatte, so muß man staunen, daß sie mehr als zwei Jahre in Betrieb war, ohne irgendeine große Störung aufzuweisen.

8.29. Eine der wertvollsten Anwendungen der Argonne-Einheit war die Messung der Neutronenabsorptionsquerschnitte von sehr mannigfaltigen Elementen, die als Konstruktionsteile in Erzeugungseinheiten hätten Verwendung finden können oder die als Unreinigkeiten in diesen Einheiten hätten vorkommen können. Diese Messungen bestanden in der Beobachtung derjenigen Änderung in der Regulierung, die man vornehmen muß, um $k_\infty = 1$ zu machen, wenn eine bekannte Menge der zu untersuchenden Substanzen an einem bestimmten Platz in der Einheit eingebaut ist. Die so erhaltenen Resultate kennzeichnete man mit dem Ausdruck «Gefahr-Koëffizienten».

8.30. Eine Öffnung an der Spitze der Einheit läßt ein sehr ein-

heitliches Bündel thermischer Neutronen austreten, die man für Experimente mit Exponentialeinheiten benutzen kann, ferner für direkte Messungen der Absorptionswirkungsquerschnitte oder für Untersuchungen mit der Wilsonschen Nebelkammer und dergleichen.

8.31. Ein interessantes Phänomen, das am obersten Teil der Einheit auftritt, ist die Erzeugung eines Bündels oder Flusses von «kalten» Neutronen. Bringt man eine genügende Menge Graphit zwischen der Oberfläche der Einheit und einem Beobachtungspunkt einige Yards[1] darüber an, dann findet man, daß die Verteilung der Neutronenenergie einer wesentlich tieferen Temperatur entspricht, als sie im Graphit herrscht. Man nimmt an, daß diese Erscheinung von einem bevorzugten Durchgang der langsamsten («kältesten») Neutronen durch die Graphitkristallstruktur herrührt. Diese Neutronen haben eine im Vergleich zu den Abständen zwischen den aufeinanderfolgenden Kristallebenen große quantenmechanische Wellenlänge.

8.32. Später wurde im Argonne-Laboratorium eine Erzeugungseinheit mit schwerem Wasser als Bremsstoff aufgebaut. Das äußerst starke Bündel von Neutronen, das hiervon erzeugt wird, stellte sich als sehr geeignet zum Studium der «Neutronenoptik», z. B. der Reflexion und Refraktion von Neutronenbündeln etwa durch Graphit, heraus.

8.33. Ein ständiges Ziel des Argonne-Laboratoriums war die bessere Erforschung der Kernprozesse im Uran, Neptunium und Plutonium. Wiederholte Experimente führten zur Verbesserung der Genauigkeit der Konstanten, wie etwa der Wirkungsquerschnitte für Spaltung durch thermische Neutronen bei U-235, U-238 und Pu-239, der Wahrscheinlichkeit von spaltungslosen Neutronenabsorptionen durch jeden dieser Kerne und der pro Spaltung ausgesandten Neutronenzahl.

DIE CLINTON-ANLAGE

8.34. Im VI. Kapitel erwähnten wir Pläne für den Bau einer Versuchsanlage zur Erzeugung von Plutonium, die auf dem Bauplatz in Clinton in Tennessee errichtet werden sollte. Im Januar 1943 waren

[1] 1 Yard = 0,9144 m.

die Pläne für dieses Projekt weit vorangeschritten; der Bau wurde kurz darauf in Angriff genommen. *M. D. Whitaker* wurde als Direktor des Clinton-Laboratoriums bestellt. Die Pläne für die Versuchsanlagen wurden von der du Pont Co. und dem «metallurgischen Laboratorium» gemeinsam aufgestellt. Die Ausführung der Konstruktion lag bei du Pont. Die Aufrechterhaltung des Betriebs wurde von der Universität Chicago als Glied des metallurgischen Projekts durchgeführt.

8.35. Hauptaufgabe der Clintonanlage war es, etwas Plutonium zu erzeugen und als Versuchsanlage für die chemische Trennung zu dienen. Hinsichtlich der Forschung lag der Nachdruck bei Clinton in der Chemie und in den biologischen Strahlungseffekten. Ein großes chemisches Laboratorium für Analysen, für Untersuchung der Reinigungsmethoden, für Studien über Spaltprodukte, für die Entwicklung von Extraktionen mittleren Umfangs, für Reinigungsprozesse und anderes war vorgesehen. Später fügte man ein «heißes» Laboratorium («hot laboratory»), d. h. ein Laboratorium für hochgradig radioaktive Substanzen, die man aus der Distanz handhaben mußte, hinzu. Auch hat es dort eine Werkstatt und ein Laboratorium für Instrumente, die sehr stark benutzt wurden. Ferner Einrichtungen für klinische und experimentelle Arbeiten der Gesundheitsabteilung, die sehr tätig war. In einem kleinen Physiklaboratorium wurden einige wichtige Arbeiten gemacht mit Neutronen von höherer Intensität, als sie im Argonne-Laboratorium zur Verfügung standen. Die Hauptinstallationen am Platz des Clinton-Laboratoriums waren die Erzeugungseinheit und die Trennanlage; diese sind weiter unten kurz beschrieben.

Die Clinton-Einheit

8.36. Bei jeder dauernd betriebenen Erzeugungseinheit muß der Vermehrungsfaktor k auf dem Wert 1 gehalten werden, gleichgültig welches Leistungsniveau besteht. Der beste Wert von k_∞, den man in einem Uraniumgraphitgitter beobachtet hatte, konnte in einer praktischen Erzeugungseinheit nicht erreicht werden wegen des Entweichens der Neutronen, wegen des Kühlsystems, der zylindrischen Kanäle für das Uran, der Schutz-

hüllen für das Uran und anderer geringfügigerer Umstände. Bei Luftkühlung und einer Maximal-Sicherheitstemperatur für die Uranoberfläche mußte man eine solche Größe der Produktionseinheit wählen, daß sie 1000 Kilowatt liefern konnte. Das effektive k würde zwar mit steigender Temperatur sinken, aber dieser Rückgang würde nicht groß genug sein, um einen entscheidenden Faktor zu bedeuten. Obwohl eine Kugel die Idealgestalt ist, empfahl es sich aus praktischen Überlegungen, rechteckige Blöcke zu wählen.

8.37. Die Clinton-Erzeugungseinheit besteht aus einem Graphitwürfel, der in horizontalen Kanälen das Uran enthält. Das Uran hat die Form von Metallzylindern, die durch gasdichte Aluminiumhüllen geschützt sind. Die Uranzylinder oder -füllungen können in die Graphitkanäle hineingleiten. Es ist Platz freigelassen für den Durchtritt der kühlenden Luft, und um die Füllungen am Ende der Einheit auszustoßen, wenn sie für den weiteren Prozeß bereit sind. Außer den Kanälen für die Füllungen sind verschiedene andere Hohlräume in der Einheit vorgesehen, für die Regulierungsstäbe, die Instrumente und anderes.

8.38. Die Clinton-Einheit war beträchtlich größer als die erste Einheit in Chicago (siehe Kapitel VI). Wichtiger als die größeren Ausmaße der Clinton-Einheit war ihr Kühlsystem, ihre schwereren Abschirmungen und Mittel zum Auswechseln der Füllungen. Als Produktionsziel der Clinton-Anlage war vorgesehen, daß sie auf einem Energieniveau von 1000 Kilowatt arbeiten sollte.

8.39. Die Instrumentierung und Regulierung sind im Prinzip die gleichen wie bei der ersten Einheit. Die Neutronenintensität innerhalb der Einheit wird durch eine mit BF_3 gefüllte Ionisationskammer gemessen und mit Borstahlstäben reguliert, die man in die Einheit einführen und aus ihr herausnehmen kann, wodurch der Anteil der Neutronen, der für Spaltungserzeugung zur Verfügung steht, variiert wird.

8.40. Trotz des eindrucksvollen Aufgebotes an Instrumenten und Sicherheitsvorkehrungen ist das hervorstechendste Merkmal der Erzeugungseinheit die Einfachheit ihres Betriebes. Während des größten Teils der Zeit hat das Betriebspersonal nichts zu tun, als die verschiedenen Instrumente abzulesen.

Die Trennanlage

8.41. Hier wie in Hanford müssen die Prozesse mit Plutonium unter Regulierung aus der Distanz und hinter dicken Schutzwänden durchgeführt werden. Die Apparatur der Trennanlage befindet sich in einer Reihe von aneinander grenzenden Zellen mit schweren Betonwänden. Diese Zellen bilden ein fortlaufendes Gefüge (ein Canyon — siehe Fußnote zu 7.33), das ungefähr 100 Fuß (30,5 m) lang und zu zwei Drittel in die Erde eingegraben ist. Anschließend an dieses «Canyon» liegen die Regulierräume, die Analysen-Laboratorien und ein Laboratorium für die weitere Reinigung des Plutoniums, das zwar schon bis zu einer verhältnismäßigen Sicherheit gereinigt wurde.

8.42. Die Uranfüllungen, die in der Einheit der Strahlung ausgesetzt waren, werden unter Wasser in die erste von diesen Zellen transportiert und dann aufgelöst. Die folgenden Operationen geschehen durch Überpumpen der Lösungen oder Aufschwemmungen von einem Tank oder einer Zentrifuge zur andern.

Tätigkeit der Clinton-Erzeugungseinheit

8.43. Die Clinton-Erzeugungseinheit wurde am 4. November 1943 in Gang gesetzt und innerhalb weniger Tage auf ein Energieniveau von 500 kW bei einer Maximaltemperatur von 110 °C an der Oberfläche der Uranfüllung gesteigert. Durch Verbesserungen der Luftzirkulation und Erhöhung der Maximaltemperatur an der Uranoberfläche auf 150 °C konnte das Energieniveau auf ungefähr 800 kW gesteigert werden; es wurde bis zum Frühjahr 1944 auf dieser Höhe aufrechterhalten. Von diesem Zeitpunkt an änderte man die Verteilung des Urans. Die Änderung hatte das Ziel, die Leistungsverteilung in der Einheit durch Verringerung der Metallmenge im Zentrum gegenüber der außerhalb angeordneten auszugleichen und dadurch das Durchschnittsleistungsniveau zu erhöhen, ohne die Temperatur irgendwo zu hoch steigen zu lassen. Gleichzeitig wurden Verbesserungen erzielt in der Abdichtung der Stabhülsen, wodurch es möglich wurde, die Einheit auf höherer Temperatur arbeiten zu lassen. So erzielte man im Mai 1944 ein Energieniveau von 1800 kW. Auch diese Leistung wurde erhöht durch Einbau besserer Ventilation im Juni 1944.

8.44. So übertraf im Juni 1944 die Leistung der Einheit beträchtlich die Erwartungen. Hinsichtlich der Leichtigkeit der Regulierung, der gleichmäßigen Wirksamkeit und der Abwesenheit gefährlicher Strahlung war die Einheit äußerst befriedigend. Es gab sehr wenig Störungen auf Grund von Fehlern in der Planung oder im Aufbau.

8.45. Die Einheit selbst war sowohl im Prinzip als auch im Betrieb einfach. Das Gleiche kann man nicht von der Pu-Trennanlage sagen. Der Schritt von der ersten Kettenreaktionseinheit zu der Clinton-Einheit war gut im voraus zu übersehen; aber ein viel größerer und unsicherer Schritt mußte bei dem Separationsprozeß getan werden; denn die Clinton-Separationsanlage wurde auf Grund von Experimenten entworfen, die nur mit Mikrogrammbeträgen von Plutonium vorgenommen wurden.

8.46. Nichtsdestoweniger, der Trennprozeß «lief»! Der erste Schub von Ausstoß[1] aus der Erzeugungseinheit gelangte am 20. Dezember 1943 in die Trennanlage. Ende Januar 1944 ging täglich $^1/_3$ Tonne Metall aus der Erzeugungsanlage in die Trennanlage. Am 1. Februar 1944 waren 190 mg Pu geliefert und am 1. März 1944 bereits mehrere gr. Überdies war der Nutzeffekt der Rückgewinnung ganz im Anfang etwa 50 % und im Juni 1944 zwischen 80 und 90 %.

8.47. Während dieser ganzen Zeit arbeitete eine große Gruppe von Chemikern in Clinton an der Verbesserung des Prozesses und an seiner Entwicklung für die Hanford-Anlage. Das Hanford-Problem unterschied sich vom Clinton-Problem dadurch, daß man viel höhere Konzentrationen von Plutonium erwartete. Überdies war, obwohl man den Chemikern zu ihrem Erfolg in Clinton gratulierte, der Prozeß kompliziert und teuer. Man mußte mit aller Kraft auf Verbesserungen in der Ausbeute oder der Reinigung oder einer allgemeinen Vereinfachung sinnen.

8.48. Abgesehen von der Erprobung der Erzeugungseinheit und der Trennanlage und der Gewinnung von mehreren Gramm Plutonium zu experimentellen Zwecken in Chicago, Clinton und anderwärts, leisteten die Clinton-Laboratorien unschätzbare

[1] «slugs» in der Sprache der Berg- und Hüttenindustrie, Zwischenprodukt = halbgeröstetes Erz, ist hier mit dem Fachworte «Ausstoß» wiedergegeben, das wohl dem Sinn am nächsten kommt.

Dienste als Schulungs- und Prüfungszentrum für Hanford, für medizinische Experimente, Studien über die Erzeugungseinheiten und die Reinigung und für physikalische und chemische Studien des Pu und der Spaltprodukte.

8.49. Zu den typischen Problemen der dort und in Chicago anzupackenden Aufgaben gehören die folgenden, die in einem der üblichen Berichte im Mai 1944 genannt sind:

Während des Mai 1944 abgeschlossene Probleme: Ausfindigmachen eines neuen Oxydationsmittels, Wirkung der Strahlen auf Wasser und wässrige Lösungen, Löslichkeit von Pu-Peroxyd, Pu-Verbindungen zur Verschiffung, Verteilung der Spaltprodukte in den Lösungen des Trennprozesses, vorläufige Prozeßplanung für Adsorptionsextraktion, Assistenz in Adsorptionsanlagen der «Halbwerke», Vervollständigung des Adsorptionsprozesses.

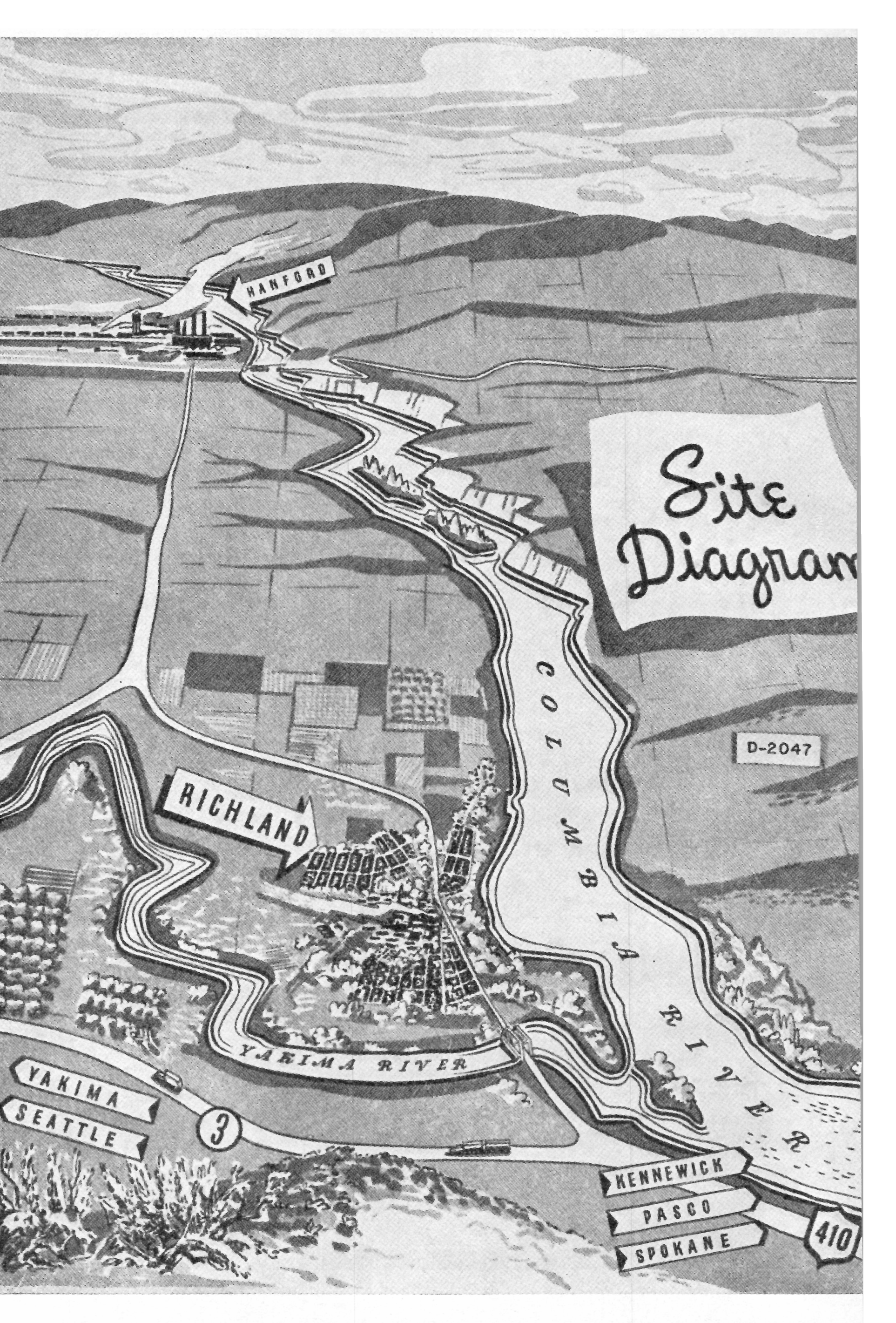
Neue Probleme, die während des Mai 1944 aufgenommen wurden: Neue Analysenmethode für die Produkte, Strahlungseffekt auf Graphit, Verbesserung der Ausbeute, neue Erforschung der Erzeugungseinheit, Wiedergewinnung des Uran aus dem Abfall, Kontrolle der Kamingase, Anordnung für radioaktive Abfallösungen, Spray-Kühlung der X-Einheit, Schulungsprogramm für die Gehaltsproben, Standardisierung der Methoden für Gehaltsprüfung, Entwicklung der Prüfungsmethoden, strahlengeschützte Apparate für die Regulierung der Gehaltsprüfungsprozesse, Nebelkammerexperimente, Alpha-Teilchen aus U-235, radiale Verteilung der Produkte, Brechung der Neutronenstrahlung.

DIE HANFORD-ANLAGE

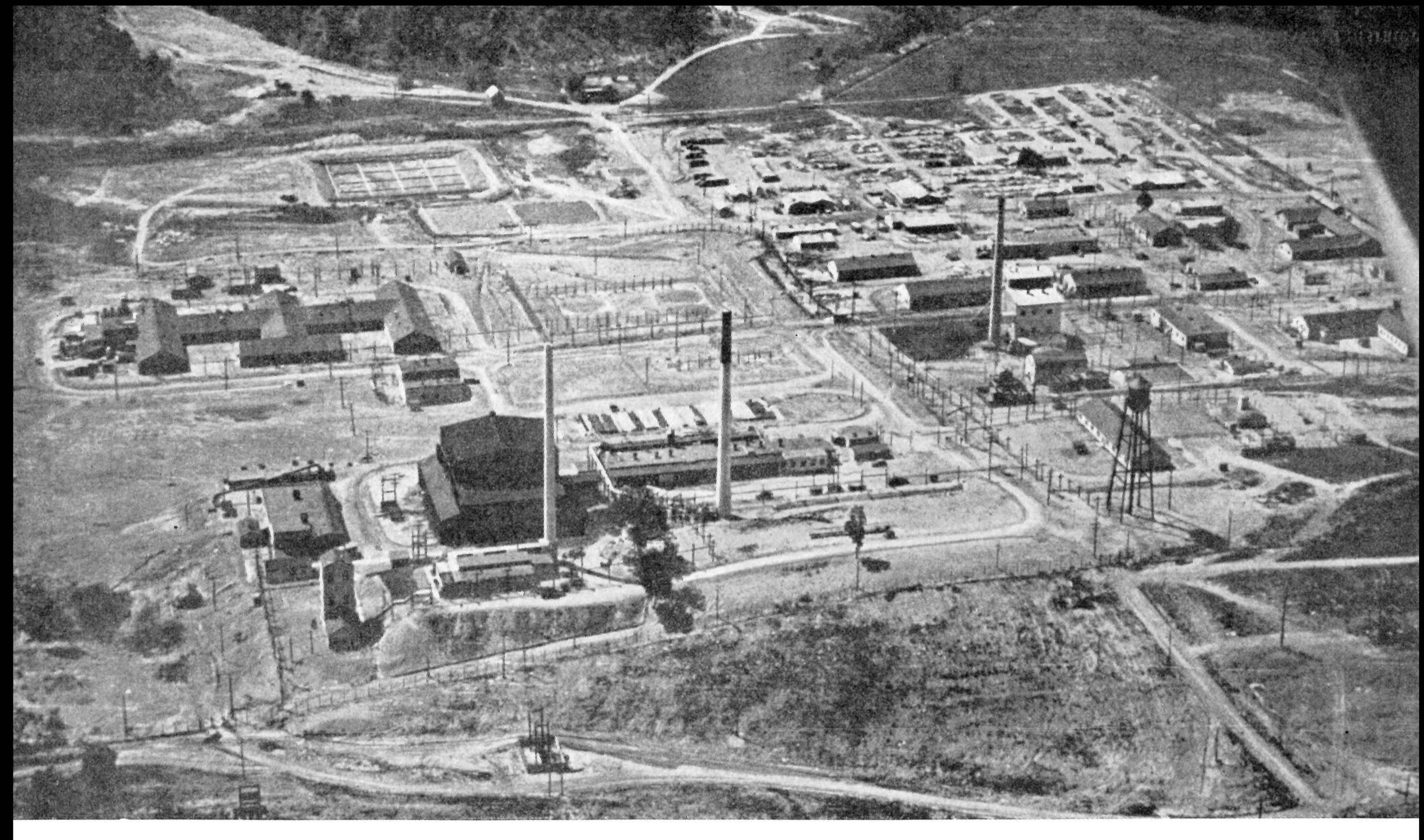
8.50. Es übersteigt den Rahmen dieses Berichtes, eine Darstellung der Konstruktion der Hanford-Ingenieurwerke zu geben, doch darf man hoffen, daß die volle Darstellung dieses ungewöhnlichen Unternehmens und seines Begleitunternehmens, der Clinton-Ingenieurwerke, in naher Zukunft veröffentlicht wird. Der Bauplatz von Hanford wurde von Vertretern des Generals *Groves* und von der du Pont Co. Ende 1942 geprüft, und seine Benutzung wurde von General *Groves* gebilligt, nachdem er ihn persönlich inspiziert hatte. Er lag auf der Westseite des Columbia-Rivers in Zentral-Washington nördlich von Pasco. In den

MANHATTAN DISTRICT

en: Verwaltungsgebäude für den Manhattan Engineer District in Oak Ridge, Tenn.
ten: Hanford bei Pasco, Wash., wo einst Tausende von Arbeitern wohnten, die die Anlagen der Hanford Engineer Works bauten. Jetzt eine Geisterstadt.



Lagediagramm der Hanford Engineer Works nahe Pasco, Wash.

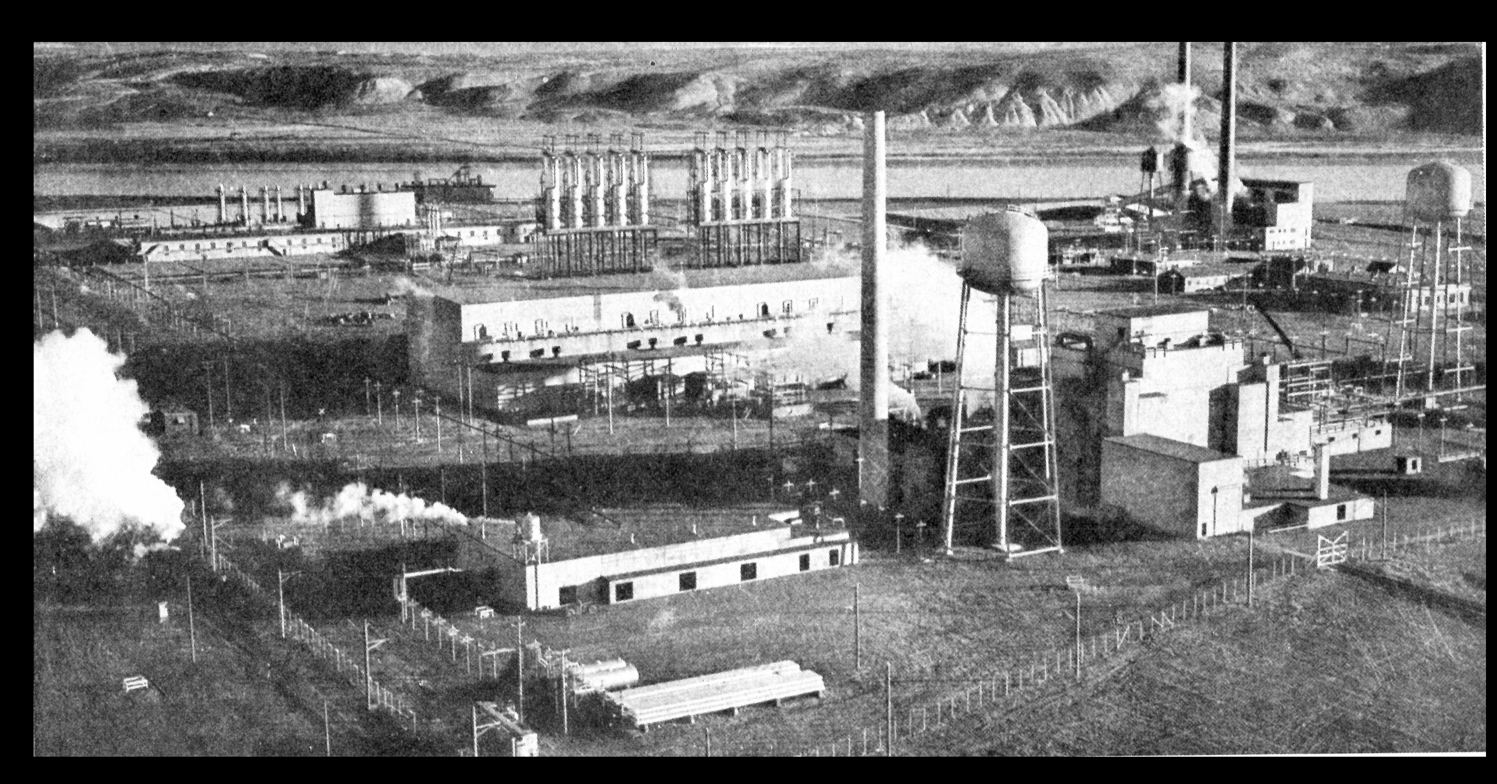


Eine Versuchsanlage der Clinton Engineer Works bei Oak Ridge, Tenn.

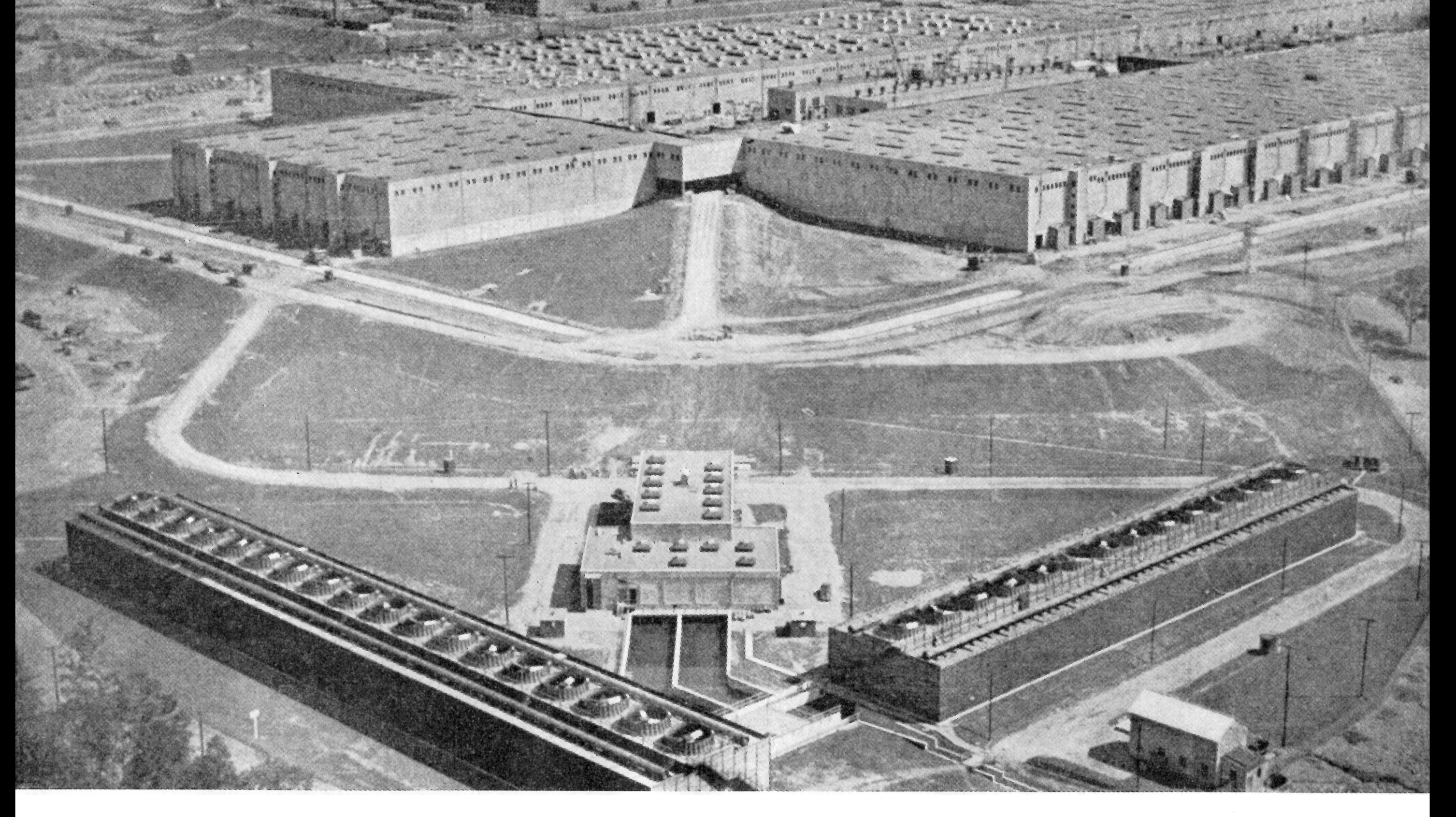
MANHATTAN DISTRICT

Eines der Produktionsfelder der Clinton Engineer Works bei Oak Ridge, Tenn.

MANHATTAN DISTRICT

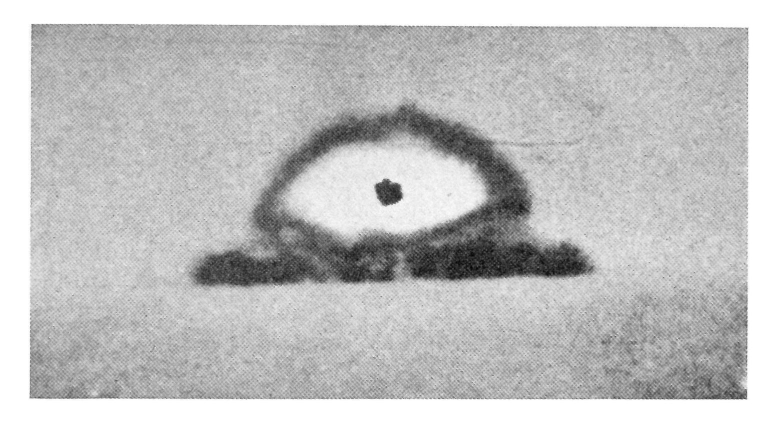


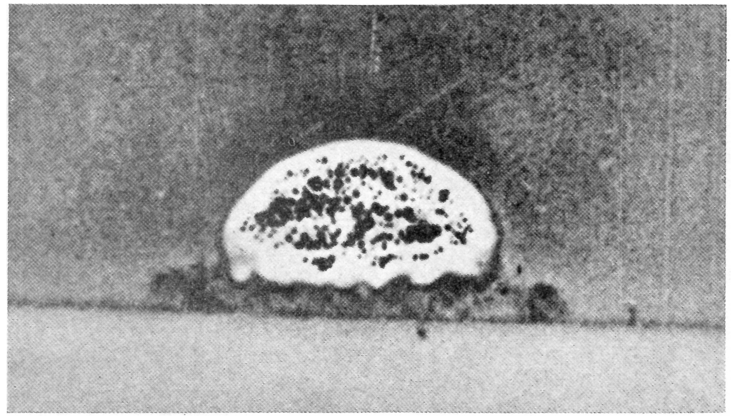
Eines der Produktionsfelder der Hanford Engineer Works in der Nähe von Pasco, Wash.

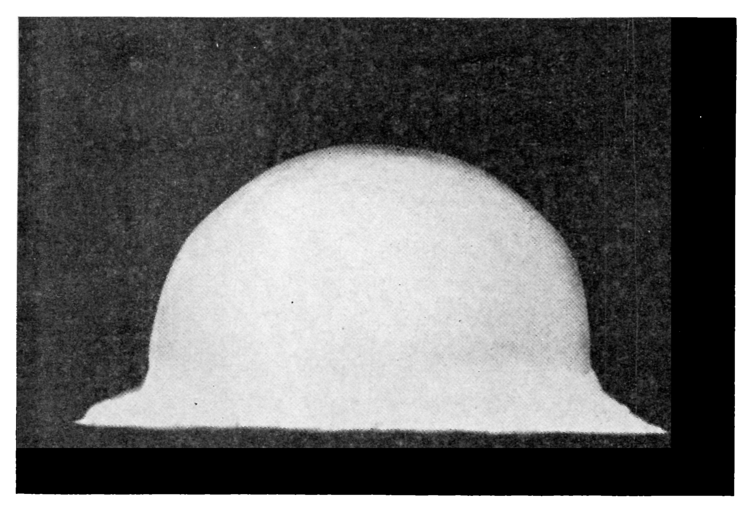


Eine der Produktionsanlagen der Clinton Engineer Works bei Oak Ridge, Tenn.

MANHATTAN DISTRICT







U.S. ARMY-ACME

Erste Probe der Atombombe in Neu-Mexico am 16. Juli, von einer Entfernung von 6 Meilen (ca. 11 km). — ***Oben:*** Der Beginn der Explosion. Diese kleine Wolke wuchs später zu einer Höhe von 40 000 Fuß empor. — ***Mitte:*** Vielfarbige Explosionswolke. Die in der Photographie schwarzen Stellen waren heller als die Sonne selbst, nach Aussagen der Beobachter. — ***Unten:*** Eine spätere Phase der Wolkenentwicklung.



U.S. ARMY-ACME

Eine Photographie vom Augenblick der Bombenexplosion, aus 6 Meilen Entfernung aufgenommen. Die Photographen glauben, daß der Kreis rechts unten durch das Eindringen des intensiven Lichtes durch ein verstopftes Loch der Kamera verursacht ist.

ersten Monaten des Jahres 1943 erwarb die Regierung (durch Pacht oder Kauf) durch Vermittlung der Real Estate Division of the Office of the Chief of Engineers (etwa: Grundeigentumsabteilung des Amtes des Chefingenieurs) ein Terrain von 200 Quadratmeilen (rund 362 km^2) in dieser Gegend. Schließlich wurde ein Bezirk von nahezu 1000 Quadratmeilen (1760 km^2) in die Hände der Regierung gebracht. Zur Zeit dieser Landerwerbung gab es dort nur einige Bauernhöfe und zwei kleine Dörfer, Hanford und Richland, sonst nur mit Salbeibüschen bestandene Ebenen und kahle Hügel. Am 6. April 1943 wurden die Erdarbeiten für das Hanford-Baulager begonnen. Im Höhepunkt der Tätigkeit im Jahre 1944 war dieses Lager eine Stadt von 60 000 Einwohnern, die viertgrößte Stadt im Staate. Heute dagegen ist das Lager praktisch verödet, weil die Belegschaft in Richland wohnt.

8.51. Die Arbeit an der ersten der Hanford-Produktionseinheiten wurde am 7. Juni 1943 begonnen, und im September kam die erste Einheit in Betrieb. Ursprünglich war der Platz für fünf Einheiten vorgesehen, aber nur drei davon wurden gebaut. Außer den Einheiten hat es natürlich Pu-Trennanlagen, Pumpstationen und Wasserreinigungsanlagen. Ferner steht dort eine Kettenreaktionseinheit mit geringem Energieniveau zur Materialprüfung. Nicht nur wurden die Einheiten selbst aus Sicherheitsgründen weit voneinander angelegt — in Abständen von mehreren Meilen —, sondern auch die Trennanlagen sind weit weg von den Erzeugungseinheiten und voneinander. Im Sommer 1945 waren alle drei Einheiten in Betrieb.

Einschalung und Korrosion

8.52. Kein Teilnehmer der Periode von Entwurf und Konstruktion der Hanford-Anlage dürfte das Einschalungsproblem, d. h. die Aufgabe, die Urankerne in metallische Schutzhüllen zu verschließen, jemals vergessen. Bei seinen periodischen Besuchen in Chicago konnte der Verfasser ungefähr den Stand dieses Einschalungsproblems aus der Atmosphäre von Verdruß oder Freude feststellen, die er im Laboratorium vorfand. Es war bestimmt keine einfache Sache, einen Schutz zu finden, der das Uran vor der Korrosion durch Wasser bewahrte, die Spaltprodukte vom Wasser fernhielt, die Wärme vom Uran in das Wasser ableitete

und außerdem nicht zuviel Neutronen absorbierte. Bereits das Versagen einer einzigen Verschalung kann begreiflicherweise den Zusammenbruch einer ganzen Betriebseinheit herbeiführen.

8.53. Die Bemühungen, dieser dringenden Aufgabe Herr zu werden, schließen Experimente über elektrische Überzüge, Schmelzüberzüge, Zementhäute, gegen Korrosion widerstandsfähige U-Legierungen und mechanische Einschalung ein. Mechanische Hüllen (cans) von dünnem Aluminium waren vom Gesichtpunkt der Kernphysik aus zulässig und wurden schon früh als die geeignetste Lösung der Aufgabe angesehen. Aber das Problem, eine einheitliche wärmeleitende Bindung zwischen dem Uran und dem einhüllenden Aluminium und zugleich einen gasdichten Abschluß für die Einschalung zu bekommen, erwies sich als sehr mühsam. Die gleichzeitige Entwicklung verschiedener Methoden mußte bis zur letzten Minute durchgeführt werden, und selbst in den letzten Wochen vor der Beschickung der Einheit mit der Uranfüllung war es nicht sicher, ob eine der in Entwicklung stehenden Methoden befriedigende Resultate ergeben würde. Eine abschließende, zwar nicht große aber deutlich wichtige Änderung in dem bevorzugten Einschaltungsprozeß wurde im Oktober 1944 eingeführt, nachdem die erste Einheit schon arbeitete. Bis zum Sommer 1945 lag kein Bericht über ein Versagen der Einschalung vor.

Gegenwärtiger Stand der Hanford-Anlagen

8.54. Während des Herbstes 1944 und der ersten Monate 1945 wurden die zweite und dritte Hanford-Einheit fertiggestellt und in Betrieb gesetzt, ebenso die zusätzlichen chemischen Trennanlagen. Dabei gab es natürlich einige Schwierigkeiten; aber keine der Befürchtungen, die man hinsichtlich des Versagens der Einschalung, der Filmbildung in den Wasserröhren oder der Strahleneinwirkungen bei den chemischen Prozessen gehegt hatte, stellte sich als gerechtfertigt heraus. So arbeiteten im Frühsommer 1945 die Einheiten mit der vorausberechneten Energie, erzeugten Plutonium und heizten den Columbiafluß. (Fußnote im englischen Text: Die tatsächliche Erhöhung der Temperatur des Flusses ist so gering, daß man keine Einwirkung auf das Leben der Fische erwarten konnte. Um doppelt sicher zu

gehen, arbeitete man zur Bestätigung dieser Erwartung eine Reihe von Experimenten aus.) Die chemischen Anlagen trennten das Plutonium vom Uranium und den Spaltprodukten mit besserer Ausbeute, als man vorausgesehen hatte. Das Endprodukt wird ständig geliefert. Wie man es benutzen kann, das bildet den Gegenstand des XII. Kapitels.

ARBEITEN ÜBER SCHWERES WASSER

8.55. In den vorhergehenden Kapiteln finden sich Bemerkungen über die Vorteile des schweren Wassers als Bremsstoff. Es ist wirksamer als Graphit in der Verlangsamung der Neutronen und hat eine geringere Neutronenabsorption als Graphit. Darum ist es möglich, eine Kettenreaktionseinheit mit Uran und schwerem Wasser aufzubauen und dabei einen beträchtlich höheren Multiplikationsfaktor k zu erzielen, und zwar bei einer kleineren Einheit als mit Graphit. Indessen muß man das schwere Wasser haben.

8.56. Im Frühjahr beschloß das «Metallurgische Laboratorium», auf die Versuche und Berechnungen einer Einheit mit schwerem Wasser mehr Nachdruck zu legen. Zu diesem Zweck wurde ein Komitee unter *E. Wigner* eingesetzt und eine Gruppe unter *H. C. Vernon* von der Columbia-Universität nach Chicago verlegt. *H. D. Smyth,* der gerade Mitdirektor (associate director) des Laboratoriums geworden war, wurde gebeten, die Gesamtleitung zu übernehmen.

8.57. Die erste Tätigkeit der Gruppe bestand in der Überlegung, auf welche Weise man am besten schweres Wasser benutzen könnte, um einen vollen Erfolg des metallurgischen Projektes zu sichern, unter Berücksichtigung des geringen Produktionsausmaßes für Erzeugung von schwerem Wasser, das bisher zugelassen war.

8.58. Dabei stellte sich heraus, daß die Produktionsstufe so gering war, daß man zwei Jahre brauchen würde, um genügend schweres Wasser zur Bremsung[1] einer angemessenen Pu-Erzeu-

[1] to moderate, moderator ist (vergl. Fußnote zu 2.9) mit bremsen und Bremsstoff übersetzt. Es handelt sich um Herabsetzung der Neutronengeschwindigkeit.

gungsanlage herzustellen. Andererseits konnte das schwere Wasser ausreichen, um eine «laboratoriumsmäßige» Einheit zu bremsen, die wertvolle Unterlagen liefern konnte. Während des Sommers 1943 war jedenfalls die Unsicherheit hinsichtlich der Kriegsdauer und des Erfolgs der andern Teile des DSM-Projektes so groß, daß eine vollständige Untersuchung der Möglichkeiten von Erzeugungseinheiten mit schwerem Wasser wünschenswert erschien. Entweder konnte man das Produktionsniveau von schwerem Wasser hinauftreiben oder die kleinere Experimentaleinheit aufbauen. Ein intensives Studium der Materie erfolgte während des Sommers 1943, aber im November entschloß man sich, das Programm zu beschneiden, und der Aufbau wurde auf eine 250 kW-Einheit auf dem Argonne-Terrain beschränkt.

Die Argonne-Einheit mit schwerem Wasser

8.59. Vielleicht ist der eindrucksvollste Aspekt der Uran-Einheit mit schwerem Wasser in Argonne ihre Kleinheit. Selbst mit ihrer umgebenden Schutzwand aus Beton ist sie relativ klein im Vergleich zu den Uran-Graphit-Einheiten.

8.60. Am 15. Mai 1944 war die Argonne-Einheit für Uran und schweres Wasser prüffertig. Nach Einführung der Uranfüllung fand man, daß sich die Kettenreaktion in der Einheit bereits aufrechterhielt, wenn nur $^{3}/_{5}$ des schweren Wassers eingeführt waren. Die Reaktionsfähigkeit der Einheit übertraf die Erwartungen so sehr, daß sie die Wirkungsfähigkeit der Regulierungsstäbe überstiegen hätte, wenn man den Rest des schweren Wassers eingeführt hätte. Um dieser überraschenden und willkommenen Situation zu begegnen, entfernte man einen Teil des Urans und fügte noch weitere Regulierungsstäbe hinzu.

8.61. Mit diesen Änderungen war es möglich, den Behälter bis zu dem geplanten Energieniveau zu füllen. Am 4. Juli 1944 berichtete *W. H. Zinn*, daß die Einheit mit 190 kW befriedigend arbeite, und am 8. August 1944 berichtete er, daß sie mit 300 kW arbeite.

8.62. Im allgemeinen unterschieden sich die Merkmale dieser Einheit wenig von denen der vergleichbaren Graphiteinheiten. Die Einheit braucht einige Stunden, um ihr Gleichgewicht zu erreichen. Sie zeigt kleine (weniger als 1 %), doch plötzliche

Schwankungen im Energieniveau, wahrscheinlich durch Blasen im Wasser herbeigeführt. Man kann sie nicht so vollständig und schnell abstellen wie die Graphiteinheit wegen der Tendenz der verzögerten Gamma-Strahlung, in schwerem Wasser zusätzlich Neutronen zu erzeugen. Wie vorauszusehen, ist die Neutronendichtigkeit im Zentrum groß. Die Abschirmungen, Regulatoren, Wärmeaustauscher usw. haben befriedigend gearbeitet.

DIE GESUNDHEITSABTEILUNG

8.63. Die Hauptaufgabe der Gesundheitsgruppe war sozusagen negativ. Sie sollte Sicherheit gewähren, daß niemand von den beschäftigten Personen durch die besonderen Gefahren der Unternehmung ernsthaft geschädigt werde. Medizinische Krankengeschichten von Personen, die ernste Schäden oder den Tod durch Strahlung erlitten, waren betont unerwünscht. Der Erfolg der Gesundheitsabteilung bei der Lösung dieser Probleme war bemerkenswert. Selbst bei der Forschungsgruppe, wo die Überwachung besonders schwierig ist, waren Fälle, die auch nur vorübergehende schwere Störungen zeigten, äußerst selten. Die Sicherheitsvorkehrungen bei der Planung und dem Betrieb der Anlage sind so groß, daß die Gefahren im Haushalt und beim Fahren mit Privatwagen für das Personal weit größer sind als diejenigen, die durch die Anlage verursacht werden.

8.64. Um ihre Aufgabe zu erfüllen, arbeitete die Gesundheitsabteilung nach drei Hauptrichtlinien:

1. Einführung einer Voruntersuchung bei Anstellung und häufige Kontrolluntersuchungen besonders bei solchen Personen, die der Strahlung ausgesetzt sind.

2. Einführung von Toleranz-Standards für Bestrahlungsdosen und Entwicklung von Meßinstrumenten zur Kontrolle der Bestrahlung des Personals; Anleitung über Abschirmung usw.; kontinuierliche Messung der Strahlungsintensität an verschiedenen Orten der Anlage; Messung der (radioaktiven) Übertragung auf Kleider, Laboratoriumstische, Abwasser, Atmosphäre usw.

3. Durchführung von Versuchen über die Wirkungen direkter Bestrahlung von Personen und Tieren mit verschiedenen Arten der Strahlung und über die Wirkungen von Einnahme und Ein-

atmung der verschiedenen radioaktiven oder toxischen Materialien wie Spaltprodukte, Plutonium und Uran.

Regelmässige Untersuchungen

8.65. Als Hauptkriterium für die Schädigung einer Person durch Strahlung diente die Zählung der weißen Blutkörperchen. Eine Anzahl Fälle von abnorm niedrigen Ziffern wurden beobachtet und mit dem Grad der Überbestrahlung in Verbindung gebracht. Personen, die merkliche Schädigungen zeigten, wurden in andere Tätigkeit versetzt oder erhielten kurzen Urlaub; niemand wies dauernde Krankheitssymptome auf.

8.66. Gleichzeitig stellte man fest, daß die Zählung der weißen Blutkörperchen kein vollständiges Kriterium liefert. Einige Tierversuche zeigten, daß ernsthafte Strahlenschädigung eintreten kann, bevor die Blutzählung irgendeine Angabe über eine vorliegende Gefahr liefert. Daraufhin wurden spezielle Blutuntersuchungen bei ausgewählten Personen und bei Tieren gemacht in der Hoffnung, auf diese Weise ein Kriterium zu finden, das als frühes Anzeichen einer Schädigung dienen könne.

Instrumente für Strahlenmessung

8.67. Die Gesundheitsabteilung hatte die Hauptverantwortlichkeit für die Entwicklung von Taschenmeßapparaten zur Bestimmung des Grades der Bestrahlung von Personen. Das erste derartige Instrument war ein einfaches Elektroskop ungefähr von der Größe und Form eines Füllfederhalters. Diese Instrumente wurden bei Beginn der Tagesarbeit elektrostatisch geladen und am Ende des Tages abgelesen. Der Entladungsgrad zeigte die gesamte ionisierende Strahlung, denen sie ausgesetzt gewesen waren, an. Leider waren sie nicht allzu zuverlässig und genau. Aber der Ablesefehler lag fast immer in der richtigen Richtung, d. h. er gab eine Übertreibung der angezeigten Strahlung an. Am Anfang pflegte man zwei von diesen Taschenmeßinstrumenten an jeden auszugeben, der in einen gefährlichen Bezirk eintrat. Abgelesen wurde bei der Ausgabe und wenn die Meßinstrumente zurückgegeben wurden. Die Instrumente selbst wurden dauernd, wenn auch nur allmählich verbessert. Später führte

die Gesundheitsabteilung Filmerkennungsmarken, d. h. kleine Filmstreifen, eingelegt in die Identifizierungsmarken, ein. Die Filme wurden periodisch entwickelt und auf Strahlenschwärzung geprüft. Solche Instrumente für Einzelpersonen wie die Taschenmeßapparate und die Filmerkennungsmarken waren zusätzliche und wahrscheinlich überflüssige Sicherheitsmaßnahmen. In Dauerbetriebsanlagen gewährt die Abschirmung allein volle Sicherheit. Ihre Wirkung steht unter häufiger Überwachung durch dauernd installierte oder durch transportable Instrumente.

8.68. Die Gesundheitsabteilung arbeitete mit der Physikabteilung zusammen an der Entwicklung und dem Gebrauch von mancherlei anderen Instrumenten. Es gab dort «Sneezy» zur Messung der Konzentration radioaktiven Staubs in der Luft und «Pluto» zur Meßung der Alpha-Strahlen aussendenden Verunreinigung (gewöhnlich Plutonium) auf Laboratoriumspulten und -einrichtungen[1]. Zähler wurden benutzt, um die Verunreinigung der Laboratoriumsmäntel vor und nach der Wäsche zu kontrollieren. An den Ausgangstoren bestimmter Laboratorien versteckt angebrachte Zähler gaben Alarm, wenn jemand mit (radioaktiv) infizierten Kleidern, Haut oder Haaren vorbeiging. Außerdem wurden regelmäßige Besichtigungen der Laboratoriumsräume durchgeführt.

8.69. Eine der Untersuchungen verlangte meteorologische Studien. Es wurde wichtig, sich Klarheit darüber zu verschaffen, ob die Abgase (in Clinton und Hanford) radioaktive Spaltprodukte in gefährlicher Konzentration ausstreuen könnten. Da nun das Verhalten dieser Gase in erheblichem Grade vom Wetter abhängt, wurden an beiden Orten Untersuchungen während mehrerer Monate angestellt und eine befriedigende Handhabung der Abgase wurde festgestellt.

Forschung

8.70. Da sowohl der Umfang als auch die Arten der Strahlungsgefahren bei dieser Unternehmung durch keine frühere Erfahrung bekannt waren, traf man alle vernünftigen Vorkehrungs-

---

[1] Unter dem Namen «Sneezy» dürfte ein Instrument ähnlich den Staubzählern oder Kernzählern gemeint sein; unter dem Namen «Pluto» ein Spitzenzähler oder Zählrohr für Alpha-Strahlen.

maßnahmen; aber es gab kein sicheres Mittel, um die Zulänglichkeit dieser Vorkehrungen festzustellen. Darum war es wichtig, die Vorkenntnisse so viel wie möglich zu ergänzen. Zu diesem Zweck wurde ein umfangreiches Programm von Tierversuchen ausgeführt, und zwar nach drei Hauptrichtungen: 1. Bestrahlung durch Neutronen, Alpha-, Beta- und Gammastrahlen; 2. Einführung von U, Pu und Spaltprodukten; 3. Einatmung von U, Pu und Spaltprodukten. Unter der Oberleitung von Dr. *Stone* wurden diese Experimente in Chicago, Clinton und an der Universität von Californien hauptsächlich durch Dr. *Cole* und Dr. *Hamilton* ausgeführt. Man erhielt umfangreiche und wertvolle Ergebnisse.

ZUSAMMENFASSUNG

8.71. Platzmangel und Sicherheitsbeschränkungen verhindern einen eingehenden Bericht über die Arbeit in Laboratorien und Anlagen zur Herstellung von Plutonium.

8.72. Zwei Typen von Neutronenabsorption sind grundlegend für die Wirkungsweise der Anlage: die eine, die Neutronenabsorption in U-235, die zur Spaltung führt, hält die Kettenreaktion als Neutronenquelle aufrecht; die andere, die Neutronenabsorption in U-238, führt zur Bildung von Plutonium, dem angestrebten Erzeugnis.

8.73. Man kann den Verlauf der Kettenreaktion in einer mit Graphit gebremsten heterogenen Erzeugungseinheit dadurch beschreiben, daß man eine einzige Generation von Neutronen verfolgt. Die ursprüngliche Zahl der schnellen Neutronen wird leicht (in geringem Grad) vermehrt durch «schnelle» Spaltungen; sie wird verringert durch Resonanzabsorption in U-238 und weiter reduziert durch Absorption bei thermischer Energie, im Graphit und anderen Materialien und durch Entweichen; die übrigbleibenden Neutronen, die in Graphit abgebremst sind, verursachen die Spaltung in U-235 und erzeugen eine neue Generation schneller Neutronen ähnlich derjenigen der vorangegangenen Generation.

8.74. Das Erzeugnis Plutonium muß durch chemische Prozesse von einer ähnlich großen Menge von Spaltprodukten und

einer sehr viel größeren Menge Uranium abgetrennt werden. Von den verschiedenen möglichen Trennungsprozessen besteht der gewählte in einer Serie von Reaktionen mit Fällung durch Träger, Lösung, Oxydierung und Reduzierung.

8.75. Die Kettenreaktion wurde bei geringem Energieniveau im Argonne-Laboratorium von Anfang 1943 an untersucht. Kettenreaktion und chemische Trennprozesse wurden in den Clinton-Laboratorien vom November 1943 an erforscht. Dort wurde auch eine beträchtliche Menge Plutonium erzeugt.

8.76. Die Hauptproduktionsanlage zu Hanford, Washington, wurde 1943 in Angriff genommen, und die erste große Erzeugungseinheit kam im September 1944 in Betrieb. Die ganze Anlage war im Sommer 1945 in Tätigkeit mit allen Kettenreaktionseinheiten und chemischen Trennanlagen und bewährte sich besser, als man vorausgesehen hatte.

8.77. Eingehende Untersuchungen über den Gebrauch von schwerem Wasser als Bremsstoff wurden angestellt, und eine Untersuchungseinheit mit schwerem Wasser wurde im Argonne-Laboratorium aufgebaut. Die Pläne für eine Erzeugungsanlage mit schwerem Wasser wurden aufgegeben.

8.78. Die Gesundheitsabteilung war in drei Hauptrichtungen tätig: 1. ärztliche Untersuchung des Personals; 2. Ratschläge hinsichtlich der Arbeitsbedingungen; 3. Untersuchungen über die Wirkung der Strahlungen. Die sorgfältige Planung und die erschöpfende Forschung dieser Abteilung führten zu einem hervorragenden Gesundheitszustand in Hanford und überall in dem gesamten Projekt.

IX. KAPITEL. ALLGEMEINE ERÖRTERUNGEN ÜBER ISOTOPENTRENNUNG

EINFÜHRENDE BEMERKUNG

9.1. Schon bevor das Plutonium entdeckt war, hatte man die Möglichkeit erkannt, aus U-235 eine Atombombe herzustellen. Da man frühzeitig zu der Ansicht kam, die Trennung der Uran-Isotopen könnte ein direkter und wichtiger Schritt in der Richtung zur Herstellung einer solchen Bombe sein, erforschte man mindestens seit sechs Jahren die Trennungsmethoden der Uran-Isotopen. Auch war die Aufmerksamkeit nicht auf Uran beschränkt, da man feststellte, daß auch die Abtrennung des Deuteriums von großer Bedeutung sei. In dem vorliegenden Kapitel werden die allgemeinen Probleme der Isotopentrennung besprochen. Spätere Kapitel werden sich mit den speziellen Anwendungen der verschiedenen Trennprozesse befassen.

DIE WIRKUNGSFAKTOREN DER ISOTOPENTRENNUNG

9.2. Die Isotopen eines Elementes unterscheiden sich laut Definition in der Masse, nicht aber in den chemischen Eigenschaften. Genauer: obwohl die Kernmassen und -strukturen verschieden sind, haben die Kerne identische Ladung, und infolgedessen sind die äußeren Elektronenstrukturen praktisch identisch. Daher sind für die meisten praktischen Zwecke die Isotopen eines Elementes nur durch solche Verfahren abtrennbar, die von der Masse abhängen.

9.3. Wie allgemein bekannt, sind die Moleküle eines Gases oder einer Flüssigkeit in dauernder Bewegung, und die durchschnittliche kinetische Energie der Moleküle hängt nur von der Temperatur ab, nicht aber von den chemischen Eigenschaften des Moleküls. Besteht also ein Gas aus einer Mischung von zwei Isotopen, so ist die mittlere kinetische Energie der leichteren und

der schwereren die gleiche. Da die kinetische Energie eines Moleküls $^1/_2\ mv^2$ beträgt, wobei m die Masse und v die Geschwindigkeit des Moleküls bedeutet, muß offenbar die Durchschnittsgeschwindigkeit eines leichteren Moleküls größer sein als die eines schwereren. Infolgedessen kann wenigstens prinzipiell jeder von der mittleren Geschwindigkeit der Moleküle abhängige Prozeß zur Trennung der Isotopen benutzt werden. Unglücklicherweise ist die durchschnittliche Geschwindigkeit umgekehrt proportional der Quadratwurzel der Masse, so daß die Differenz für die gasförmigen Verbindungen der Uran-Isotopen sehr klein ist. Auch überdecken sich trotz der Verschiedenheit der *Durchschnitts*geschwindigkeiten die Geschwindigkeitsbereiche selbst erheblich. So hat beispielsweise im Falle des gasförmigen Uran-Hexafluorids über 49 % der leichten Moleküle ebenso geringe Geschwindigkeiten wie 50 % der schweren Moleküle.

9.4. Offensichtlich besteht kein gangbarer Weg, mechanische Kräfte direkt auf die einzelnen Moleküle wirken zu lassen; man kann sie nicht mit einem Stock stoßen oder mit einem Strick ziehen. Aber sie unterliegen den Gravitationsfeldern, und wenn sie ionisiert sind, können auf sie elektrische und magnetische Felder wirken. Die Gravitationskräfte sind natürlich proportional den Massen. In einem sehr hohen Vakuum müssen U-235-Atome und U-238-Atome mit derselben Beschleunigung fallen. Aber ebenso wie eine Feder oder ein Stein mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten in der Luft fallen, wo Reibungskräfte ihre Bewegung hindern, kann es Bedingungen geben, unter denen eine Kombination von Gravitationskräften und ihnen entgegengesetzten intermolekularen Kräften die schweren Atome anders als die leichten zu bewegen trachten. Elektrische und magnetische Felder lassen sich leichter handhaben als Gravitationsfelder oder «Pseudogravitations»felder (d. h. Zentrifugalkraftfelder) und sind recht wirksam, Ionen unterschiedlicher Masse zu trennen.

9.5. Natürlich gibt es außer Gravitationskräften oder elektromagnetischen Kräften auch interatomare und intermolekulare Kräfte. Diese Kräfte regieren die Wirkungen zwischen den Molekülen und beeinflussen die Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen, von Verdampfungsprozessen und anderen. Im allgemeinen werden solche Kräfte von den äußeren Elektronen der

Moleküle abhängen und nicht von den Kernmassen. Jedoch erscheint ein (gewöhnlich sehr kleiner) Masseneffekt, wenn immer Kräfte zwischen getrennten Atomen oder Molekülen zur Bildung von neuen Molekülen führen. In Übereinstimmung mit den Gesetzen der Quantenmechanik werden die Energieniveaus der Moleküle leicht verändert und werden verschieden für jedes Isotop. Solche Effekte ändern ein wenig das Verhalten zweier Isotope bei manchen chemischen Reaktionen, wie wir sehen werden, obwohl dieser Unterschied im Verhalten viel kleiner ist als die bekannten Differenzen im chemischen Verhalten zwischen einem Element und einem andern.

9.6. Dies sind also die Hauptfaktoren, die wir beim Entwurf eines Separationsprozesses in Betracht ziehen müssen: die Gleichheit der durchschnittlichen thermischen Energie der Moleküle bei einer gegebenen Temperatur, die Gravitations- oder Zentrifugaleffekte, die der Kernmasse proportional sind, die elektrischen oder magnetischen Kräfte, die auf ionisierte Moleküle wirken, und die interatomaren oder intermolekularen Kräfte. Bei einigen Isotopentrennprozessen wirkt nur einer dieser Effekte mit, und man kann die Gesamtgeschwindigkeit der Trennung voraussagen. Bei anderen Isotopenprozessen finden mehrere dieser Wirkungen zugleich statt, so daß eine Voraussage schwierig ist.

KRITERIEN ZUR BEWERTUNG EINES SEPARATIONSPROZESSES

9.7. Bevor wir die für Isotopentrennung geeigneten Einzelprozesse besprechen, müssen wir wissen, was nötig ist. Folgendes sind die Hauptkriterien zur Beurteilung eines Isotopentrennprozesses.

TRENNUNGSFAKTOR (SEPARATIONSFAKTOR)

9.8. Der Trennungsfaktor, gelegentlich als Anreicherungs- oder Fraktionierungsfaktor eines Prozesses bezeichnet, ist das Verhältnis der relativen Konzentration des gewünschten Isotops *nach* dem Prozeß zur relativen Konzentration *vor* dem Prozeß. Genauer definiert: wenn vor dem Prozeß die Anzahlen der Atome der Isotopen von den Massen m_1 und m_2 die Werte n_1 bzw. n_2

(pro Gramm der Isotopenmischung) haben, und wenn nach dem Prozeß die entsprechenden Zahlen n'_1 und n'_2 sind, dann ist der Trennfaktor:

$$r = \frac{n'_1/n'_2}{n_1/n_2}$$

Diese Definition kann man auf eine Stufe einer Trennanlage oder auch auf die ganze vielstufige Anlage anwenden. Wir sind im allgemeinen entweder am «Einzelstufen»-Trennfaktor oder am «Gesamt»-Trennfaktor des ganzen Prozesses interessiert. Wenn r nur ein wenig größer als 1 ist, was bei Einzelstufen oft vorkommt, gebraucht man statt r gelegentlich eher die Zahl r—1. Der Betrag r—1 wird Anreicherungsfaktor genannt. Bei natürlichem Uran ist $m_1 = 235$, $m_2 = 238$ und $n_1/n_2 = 1/140$ (angenähert); aber bei 90%igem Uran-235 beträgt $n'_1/n'_2 = 9/1$. Folglich muß in einem Prozeß, der 90%iges U-235 aus natürlichem Uran erzeugt, der Gesamtwert von r ungefähr 1260 sein.

Ausbeute

9.9. In nahezu jedem Prozeß bedeutet ein hoher Trennfaktor eine kleine Ausbeute — eine Tatsache, die zu dauernden Kompromissen zwingt. Wenn kein Anlaß vorliegt, umgekehrt zu verfahren, werden wir die Ausbeute in Einheiten von U-235 angeben. So bedeutet eine Trennanlage mit einem Separationsfaktor 2, das heißt $n'_1/n'_2 = 1/70$[1], und einer Ausbeute von 1 gr pro Tag, daß sie aus natürlichem Uran in einem Tag 1 gr U-235 gemischt mit 70 gr U-238 erzeugt.

Beschickung (hold-up)

9.10. Der Gesamtbetrag des Materials, das in einer Separationsanlage enthalten ist, wird «hold-up» (Beschickung) genannt. Die Beschickung kann sehr groß sein in einer Anlage, die aus vielen Stufen besteht.

Anlaufzeit

9.11. In einer Trennanlage mit großer Beschickung dauert es lange Zeit — vielleicht Wochen oder Monate — bis ein Stand gleichmäßiger Tätigkeit erreicht ist. Bei der Zeitplanung muß

[1] Statt dem natürlichen Verhältnis $n_1/n_2 = 1/140$.

diese Anlaufzeit (start-up) oder Gleichgewichtszeit («equilibrium») zu der Zeit hinzuaddiert werden, die man für den Aufbau der Anlage braucht.

Wirksamkeit

9.12. Wird eine gewisse Menge Rohmaterial in eine Trennanlage gefüllt, so wird davon ein Teil angereichert, ein Teil verarmt, und der Rest bleibt unverändert. Von jedem dieser drei Teile werden Anteile verloren gehen und Anteile zurückgewonnen werden. Die Wichtigkeit einer sehr wirksamen Rückgewinnung des angereicherten Materials liegt auf der Hand. Bei manchen Prozessen kann man den Betrag des unveränderten Materials vernachlässigen, aber in anderen, insbesondere bei den weiter unten beschriebenen elektromagnetischen ist dies der größte Anteil, und darum ist die Wirksamkeit, mit der man sie zurückgewinnen und in den Arbeitsprozeß zurückführen kann, sehr wichtig. Die Bedeutung der Rückgewinnung des verarmten Materials variiert stark und hängt in hohem Maß vom Grad der Verarmung ab. Somit muß man im allgemeinen viele verschiedene Wirksamkeitsgrade ins Auge fassen.

Kosten

9.13. Wie in allen Teilen des Uranprojektes war auch hier der Zeitaufwand wichtiger als der Geldaufwand. Aus diesem Grunde wurde eine Anzahl von U-235- und Deuterium-Großtrennanlagen mit einem größeren Kostenaufwand aufgebaut, als es nötig gewesen wäre, wenn man den Aufbau einige Monate oder Jahre bis zur Ausarbeitung vollkommenerer Prozesse hätte aufschieben können.

EINIGE TRENNPROZESSE

Gasdiffusion

9.14. Bereits im Jahre 1896 hatte Lord *Rayleigh* gezeigt, daß ein Gemisch zweier Gase von verschiedenem Atomgewicht dadurch teilweise zerlegt werden könne, daß man es durch poröse Wände in einen evakuierten Raum diffundieren lasse. Die Moleküle des leichteren Gases diffundieren wegen ihrer höheren

Durchschnittsgeschwindigkeit schneller durch die Porenwand, so daß im durchgetretenen Gas (dem sogenannten Diffusat) die leichtere Komponente angereichert ist und der Rückstand, der nicht durch die Trennwand hindurchtrat, an der leichteren Komponente verarmt ist. Das am stärksten mit der leichteren Komponente angereicherte Gas wird als «Momentan-Diffusat» («instantaneous diffusate») bezeichnet. Es ist derjenige Anteil, der diffundiert, bevor die Verarmung des Rückstandes merklich geworden ist. Wenn der Diffusionsprozeß solange fortgesetzt wird, bis nahezu alles Gas durch die Trennwand diffundiert, nimmt natürlich die durchschnittliche Anreicherung des Diffusates ab. Im nächsten Kapitel werden wir diese Phänomene näher ins Auge fassen. Hier soll nur dargelegt werden, daß unter der Annahme, daß die Diffusionsgeschwindigkeiten den Wurzeln der Molekulargewichte umgekehrt proportional sind, der Trennfaktor für das Momentandiffusat, genannt «idealer Separationsfaktor» α, gegeben ist durch:

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

worin M_1 das Molekulargewicht des leichteren Gases und M_2 das des schwereren bedeutet. Wendet man diese Formel auf den Fall des Urans an, so zeigt sich der große Umfang des Trennproblems. Da Uran selbst nicht gasförmig ist, muß man irgend eine gasförmige Verbindung davon verwenden. Die einzige offenbar brauchbare ist Uran-Hexafluorid UF_6, das bei einer Temperatur von 56 ^{0} C einen Gasdruck von einer Atmosphäre besitzt. Da Fluor nur ein Isotop hat, sind die zwei wichtigen Uran-Hexafluoride $U^{235}F_6$ und $U^{238}F_6$. Ihre Molekulargewichte sind 349 und 352. Auf diese Weise erhält man, wenn man einen kleinen Teil des Uran-Hexafluorids durch die poröse Wand diffundieren läßt, eine Anreicherung des $U^{235}F_6$ um einen Faktor

$$\alpha = \sqrt{352/349} = 1{,}0043$$

der weit entfernt ist von dem Wert 1260, den man § 9.8 zufolge braucht.

9.15. Solche Berechnungen mögen es als hoffnungslos erscheinen lassen, Isotopen durch Diffusionsprozesse zu trennen (ausgenommen vielleicht die Isotope des Wasserstoffs). Tatsäch-

lich aber kann man sie mit Erfolg sogar für Uran benutzen. Die Gasdiffusionsmethode hat *F. W. Aston* bei seiner ersten teilweisen Trennung von Isotopen benutzt (und zwar bei den Isotopen des Neons). Später waren *G. Hertz* und andere, die mit vielstufigen Rückflußdiffusions-Einheiten arbeiteten, in der Lage, eine praktisch vollständige Trennung der Neon-Isotope herbeizuführen. Weil nun das vielstufige Rückflußsystem fast für alle Trennungsmethoden nötig ist, soll es unmittelbar nach den einführenden Bemerkungen über die verschiedenen Methoden, zu denen es gehört, etwas detaillierter beschrieben werden.

Fraktionierte Destillation

9.16. Die Trennung von Verbindungen mit verschiedenem Siedepunkt, das heißt also verschiedenem Dampfdruck, mit Hilfe des Destillationsverfahrens ist ein gebräuchlicher Industrieprozeß. So wird die Trennung von Alkohol und Wasser (bei denen die Differenz der Siedepunkte etwa 20 ° C beträgt) allgemein in einem einfachen und heute noch gebräuchlichen einzelnen Verdampfer und Kondensator ausgeführt. Das kondensierte Material (Kondensat) kann angesammelt und, wenn nötig, mehrmals destilliert werden. Aber für die Trennung von Verbindungen mit sehr benachbartem Siedepunkt wäre es zu mühsam, die notwendige Anzahl aufeinanderfolgender Verdampfungen und Kondensationen als getrennte Operationen durchzuführen. Statt dessen macht man in einer Fraktionierungssäule eine kontinuierliche Trennung. Der wesentliche Zweck einer Fraktionierungssäule besteht in der Erzeugung eines emporsteigenden Gasstromes und eines absteigenden Flüssigkeitsstromes, die untereinander in enger Berührung stehen und dauernd Moleküle tauschen. Die Moleküle des Anteils mit tieferem Siedepunkt haben eine verhältnismäßig größere Tendenz, in den gasförmigen Strom einzugehen, und umgekehrt. Solche Gegenstrom-Destillations-Methoden kann man anwenden, um leichtes und schweres Wasser zu trennen, deren Siedepunkte um 1,4 ° C differieren.

Allgemeine Anwendung von Gegenstrom

9.17. Die Methode des Gegenstromverfahrens ist nicht nur bei zweiphasigen (Flüssigkeit — Gas) Destillationsprozessen, son-

dern auch in andern Trennprozessen nützlich, so bei denjenigen, bei denen Diffusionen durch Temperaturvariationen (Gradienten), in einphasigen Systemen verwendet werden, oder solchen mit Zentrifugalkräften. Die Gegenströme können aus zwei Gasen, zwei Flüssigkeiten oder einem Gas und einer Flüssigkeit bestehen.

Die Zentrifuge

9.18. Wir haben dargelegt, daß die Trennung zweier Isotopen durch Schwerkraft stattfinden kann, weil die Gravitationskräfte mit der Tendenz, die Moleküle nach abwärts zu bewegen, den Molekulargewichten proportional sind und die intermolekularen Kräfte, die sich der Abwärtsbewegung entgegensetzen, von den Elektronenschalen und nicht von den Molekulargewichten abhängen. Da die Zentrifuge wesentlich auf der Anwendung sehr beträchtlicher Pseudo-Gravitationskräfte beruht, wurde sie schon früh als zur Isotopentrennung geeignet betrachtet. Immerhin scheiterten die ersten Experimente mit Zentrifugen. Erst die Zentrifugen mit hohen Geschwindigkeiten, welche durch *J. B. Beams* und andere später entwickelt wurden, führten zum Erfolg. *H. C. Urey* schlug die Benutzung von großen Zylinder-Zentrifugen mit Gegenströmung vor; diese Art von Zentrifugen wurde erfolgreich entwickelt.

9.19. In einer solchen Gegenstromzentrifuge entsteht ein abwärts gerichteter Gasstrom im äußeren Teil des rotierenden Zylinders und ein aufwärtsgerichteter Gasstrom im zentralen oder axialen Teil. Quer durch den Zwischenraum zwischen den beiden Strömen hindurch entsteht ein dauernder Diffusionsstrom beider Molekülarten von einem Strom zum andern; aber das radiale Kraftfeld der Zentrifuge wirkt stärker auf die schweren Moleküle als auf die leichten, so daß die Konzentration der schweren in der peripheren Region wächst und in der Axialregion sinkt — und umgekehrt bezüglich der leichteren Moleküle.

9.20. Der große Reiz, die Zentrifuge für die Separation schwerer Isotope wie der des Urans zu benutzen, besteht darin, daß der Trennfaktor von der Differenz der Masse der beiden Isotope abhängt und nicht von der Quadratwurzel des Massenverhältnisses wie bei der Diffusionsmethode.

THERMISCHE DIFFUSIONSMETHODE

9.21. Die kinetische Gastheorie erlaubt den Differenzbetrag der Diffusionsgeschwindigkeiten von Gasen verschiedener Molekulargewichte vorauszuberechnen. Auf die Möglichkeit, praktisch Isotopentrennung durch thermische Diffusion durchzuführen, kam man durch theoretische Studien über die Einzelheiten der molekularen Zusammenstöße und über die intermolekularen Kräfte. Derartige von *Enskog* und *Chapman* von 1920 durchgeführte Studien legten folgendes nahe: Besteht in einem Gasgemisch ein Temperaturgradient, so hat darin die eine Molekülart die Tendenz zur Konzentration in der kalten Region und die andere in der warmen Region. Diese Tendenz hängt nicht nur von den Molekulargewichten ab, sondern auch von den zwischen den Molekülen wirkenden Kräften. Ist das Gas ein Gemisch von zwei Isotopen, so kann das schwere Isotop sich in der wärmeren oder in der kälteren Region ansammeln oder überhaupt nicht, je nach der Natur der intermolekularen Kräfte. Tatsächlich kann sich die Richtung der Trennung umkehren, wenn die Temperatur oder die relative Konzentration geändert wird.

9.22. Solche thermischen Diffusionseffekte wurden zur Isotopentrennung zuerst durch *H. Clusius* und *G. Dickel* in Deutschland im Jahre 1938 angewendet. Diese versahen ein vertikales Rohr entlang der Rohrachse mit einem Heizdraht, der eine Temperaturdifferenz von etwa 600 °C zwischen der Achse und der Peripherie erzeugte. Der Effekt war zweifach. Erstens wurden die schweren Isotopen (der von ihnen studierten Substanzen) in der Nähe der kühlen Außenwand konzentriert, und zweitens hatten diese kühlen Gase an der Außenseite die Tendenz, zu sinken, während die heißen Gase um die Achse nach oben tendierten. Diese thermische Konvektion erzeugte einen Gegenstrom, und die thermische Diffusion verursachte eine bevorzugte Richtung der schweren Moleküle nach außen quer zur Berührungsfläche der beiden Ströme.

9.23. Die Theorie der thermischen Diffusion ist ziemlich kompliziert; die der thermischen Diffusion von Flüssigkeiten ist praktisch unmöglich. Jedoch ergibt sich ein Trenneffekt, und er wurde erfolgreich zur Trennung des leichten vom schweren Uran-Hexafluorid benutzt.

Chemische Austauschmethoden

9.24. In der Einleitung zu diesem Kapitel legten wir dar, daß man mit einiger Berechtigung hoffen darf, Isotopentrennung mit normalen chemischen Reaktionen durchzuführen. Tatsächlich hat man gefunden, daß bei einfachen Austauschreaktionen zwischen Verbindungen zweier verschiedener Isotope die sogenannte Gleichgewichtskonstante nicht genau = 1 ist und daß damit bei Reaktionen dieser Art eine Trennung vorkommen kann. So enthält zum Beispiel beim katalytischen Austausch der Wasserstoffatome zwischen gasförmigem Wasserstoff und Wasser das Wasser eine zwischen drei- und viermal höhere Konzentration von Deuterium als der gasförmige Wasserstoff, der im Gleichgewicht mit dem Wasser steht. Zwischen Wasserstoff und Wasserdampf hat dieser Effekt im ganzen den gleichen Charakter, aber das Gleichgewicht stellt sich rascher her. Es gelingt, diese Methode zu einer kontinuierlichen Gegenstromanordnung auszugestalten, ähnlich derjenigen bei der Destillation, und derartige Anordnungen sind derzeit zur Produktion von schwerem Wasser in Gebrauch. Die allgemeine Methode kennt man gut, und man weiß, daß die Trenneffekte im allgemeinen mit steigendem Molekulargewicht abnehmen, so daß nur eine kleine Chance besteht, die Methode auch für schwere Isotopen wie die des Urans erfolgreich anzuwenden.

Elektrolytische Methode

9.25. Die elektrolytische Methode der Isotopentrennung entstand aus der Entdeckung, daß Wasser, das in den elektrolytischen Zellen für reguläre industrielle Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff enthalten war, eine erhöhte Konzentration von Molekülen des schweren Wassers besaß. Eine vollständige Erklärung dieses Effektes ist noch nicht gefunden worden. Vor dem Krieg beruhte praktisch die ganze Erzeugung von schwerem Wasserstoff auf der elektrolytischen Methode. Bei weitem die größte Erzeugung fand in Norwegen statt, aber genügend für zahlreiche experimentelle Zwecke war auch in den Vereinigten Staaten hergestellt worden.

Statistische Methoden im allgemeinen

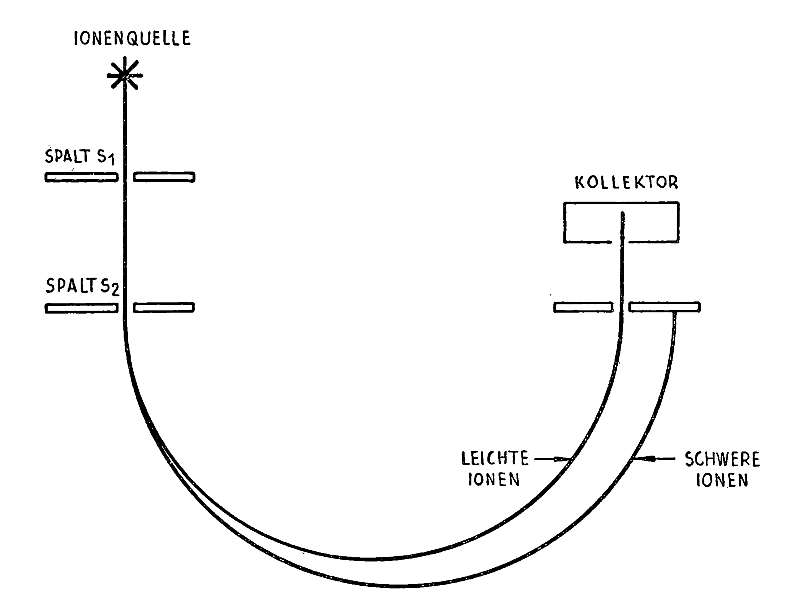
9.26. Die sechs Methoden der Isotopentrennung, die wir bisher beschrieben haben (Diffusion, Destillation, Zentrifugation, thermische Diffusion, Austauschreaktion und Elektrolyse), wurden alle entweder für Uran oder für Wasserstoff oder für beide mit einem gewissen Erfolg versucht. Jede dieser Methoden beruht auf kleinen Unterschieden im *durchschnittlichen* Verhalten der Moleküle der verschiedenen Isotopen. Da nun jeder Durchschnitt definitionsmäßig eine statistische Angelegenheit ist, werden alle diese grundsätzlich vom durchschnittlichen Verhalten anhängigen Methoden statistische Methoden genannt.

9.27. Hinsichtlich der Kennzeichen zur Beurteilung der Trennprozesse sind die sechs statistischen Methoden einander ziemlich ähnlich. In jedem Fall ist der Trennfaktor klein, so daß viele aufeinanderfolgende Stufen der Trennung nötig werden. In den meisten Fällen lassen sich relativ große Stoffmengen in Anlagen mäßiger Größe bearbeiten. Beschickung und Anlaufzeit variieren beträchtlich, sind aber im allgemeinen hoch. Die Ähnlichkeit der sechs Methoden macht es anratsam, unter ihnen eine endgültige Auswahl zu treffen, ohne zuvor das besondere Isotop, die Produktionsgeschwindigkeit etc., die gewünscht werden, im einzelnen zu studieren. Austauschreaktion und elektrolytische Methoden sind im Falle des Urans wahrscheinlich unbrauchbar, und kein Destillationsverfahren für Uran überdauerte das Versuchsstadium. Die andern drei Methoden sind sämtlich mit verschiedenem Erfolgsgrad für Uran entwickelt worden, werden aber für Wasserstoff nicht verwendet.

DIE ELEKTROMAGNETISCHE METHODE UND IHRE GRENZEN

9.28. Die Existenz nichtradioaktiver Isotope wurde zuerst beim Studium des Verhaltens ionisierter Gasmoleküle in elektrischen und magnetischen Feldern konstatiert. Solche Felder sind es gerade, welche die Grundlage für die sogenannte Massenspektrographie oder die elektromagnetische Methode der Isotopentrennung bilden. Diese Methode ist für die Bestimmung der relativen Häufigkeit vieler Isotopentypen die bestanwendbare. Sie wird dauernd angewendet, um die Resultate der Uran-Isotopen-Trennmethoden,

die schon beschrieben wurden, zu kontrollieren. Der Grund, daß diese Methode so wertvoll ist, liegt darin, daß mit ihr bequem eine beinahe vollständige Trennung der Isotopen in sehr kurzer Zeit durchgeführt werden kann, und zwar mit einer kleinen Beschickung und kurzer Anlaufszeit. Wenn dem so ist, so möchte man wohl fragen, warum überhaupt eine andere Trennmethode



MAGNETISCHES FELD SENKRECHT ZUR ZEICHNUNGSEBENE

in Betracht gezogen wird. Die Antwort lautet, daß ein gewöhnlicher Massenspektrograph nur winzige Materialmengen bearbeiten kann, gewöhnlich in der Größenordnung von Bruchteilen eines Mikrogramms pro Stunde.

9.29. Um die Gründe für diese Begrenzung der Ausbeute zu verstehen, wollen wir die Arbeitsweise eines einfachen Typs von Massenspektrograph, wie er zuerst von *A. J. Dempster* 1918 benutzt wurde, skizzieren. Ein derartiges Instrument ist schematisch in der obigen Zeichnung dargestellt. Die gasförmige Verbindung, die der Trennung unterworfen werden soll, wird in die Ionenquelle eingeführt, wo einige ihrer Moleküle durch elektri-

sche Entladung ionisiert werden. Einige der Ionen gehen durch den Schlitz s_1 hindurch. Zwischen s_1 und s_2 werden sie durch ein elektrisches Feld beschleunigt auf praktisch dieselbe kinetische Energie, welche tausendmal größer ist als die durchschnittliche thermische Energie. Da sie nun praktisch alle die gleiche kinetische Energie haben, müssen die leichteren Ionen geringerere Impulse als die schweren besitzen. Wenn sie beim Schlitz s_2 in das magnetische Feld eintreten, werden alle Ionen senkrecht zum magnetischen Feld in Halbkreisbahnen abgelenkt, deren Radien zu ihren Impulsen proportional sind. Folglich werden die leichteren Ionen sich in engeren Halbkreisen als die schweren bewegen, und bei geeigneter Anordnung des Kollektors werden nur die leichten Ionen darin aufgefangen.

9.30. Wir möchten die Einzeldiskussion einer solchen Trennanordnung zurückstellen und auf die prinzipiellen Überlegungen eingehen, denen zufolge die hindurchgehenden Materialmengen begrenzt sind. Es sind deren drei: 1. Es ist schwierig, große Mengen von Gasionen zu erzeugen. 2. Man verwendet gewöhnlich ein scharf begrenztes Ionenbündel (wie das Beispiel zeigt), so daß nur ein Bruchteil der erzeugten Ionen ausgenützt wird. 3. Zu große Dichtigkeiten der Ionen in einem Strahlenbündel können Raumladungseffekte verursachen, welche die Trennwirkung stören. Die vor 1941 entdeckten elektromagnetischen Methoden hatten zwar sehr hohe Trennfaktoren, aber ungemein geringe Ausbeuten und Wirksamkeiten. Das waren die Gründe, die — vor dem Sommer 1941 — das Uran-Komitee veranlaßten, solche Methoden für U-235-Abtrennung in großem Maßstabe auszuschließen (siehe 4.31). Seit jener Zeit erkannte man, daß die Grenzen nicht unüberwindbar sind. Tatsächlich wurden die ersten reinen U-235-Proben von annehmbarer Menge durch einen elektromagnetischen Separator erzeugt, wie wir in einem späteren Kapitel beschreiben werden.

ANDERE ISOTOPEN-TRENNMETHODEN

9.31. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Isotopen-Trennmethoden wurden noch verschiedene andere untersucht. Darunter befand sich die Methode der Ionen-Beweglichkeit, die, wie der Name sagt, auf folgender Tatsache beruht: In einer elektrolyti-

schen Lösung wandern zwei chemisch-identische Ionenarten von verschiedener Masse unter der Wirkung eines elektrischen Feldes mit verschiedener Geschwindigkeit durch die Lösung. Freilich ist die Differenz der Beweglichkeit gering und wird leicht durch Störungseffekte verschleiert. *A. K. Brewer* vom Bureau of Standards berichtete, daß ihm die Trennung der Kalium-Isotope auf diese Weise gelungen sei. *Brewer* erzielte auch einige interessante Resultate mit einer Verdampfungsmethode. Zwei neue elektromagnetische Methoden, das Isotron und die Ionenzentrifuge werden in Kapitel XI beschrieben. Das Isotron lieferte eine Anzahl Proben angemessener Größe von teilweise abgetrenntem Uran. Auch die Ionenzentrifuge erzeugte einige Uranproben, die Trennung zeigten; aber ihre Wirkung war unzuverlässig.

KASKADEN UND KOMBINIERTE PROZESSE

9.32. Bei allen statistischen Isotopen-Trennmethoden sind viele aufeinanderfolgende Trennstufen nötig, um ein Material zu erzeugen, das zu 90 oder mehr Prozent aus U-235 oder Deuterium besteht. Eine solche Serie aufeinanderfolgender Trennstufen wird eine Kaskade genannt, wenn ein kontinuierlicher Fluß von einer Stufe zur nächsten erfolgt (eine Fraktionierungssäule mit getrennten Platten, wie beschrieben, ist ein Beispiel einer einfachen Kaskade von Trenneinheiten). Eine vollständige Analyse der Probleme einer Kaskade ließe sich unter allgemeinen Gesichtspunkten darstellen. Eine solche ist ausgearbeitet worden von *R. P. Feynman* von Princeton und andern für eine gewisse Art von elektromagnetischem Separator, und von *K. Cohen* und *I. Kaplan* von Columbia, von *M. Benedict* und *A. M. Squires* von der Kellex Corporation und anderen für Diffusionsprozesse. Augenblicklich wollen wir nur zwei Feststellungen über mehrstufige Anlagen oder Kaskaden-Anlagen machen.

9.33. Der erste Punkt besagt, daß sie nach dem Rückflußverfahren eingerichtet sein müssen. Betrachten wir eine U-235-Trennanlage. Das in irgendeine Stufe oberhalb der ersten eingefüllte Material ist bereits an U-235 angereichert worden. Ein Teil dieses Materials wird beim Durchgang durch die ins Auge gefaßte Stufe weiter angereichert. Der Rückstand ist typisch verarmt, aber nicht so stark, daß er wertlos wäre. Er muß zu einer frühe-

ren Stufe zurückkehren und wieder umlaufen. Sogar das verarmte Material der ersten (am wenigsten angereicherten Stufe) mag noch den Rückfluß lohnen; etwas von dem U-235, das es noch enthält, kann zurückgewonnen («stripped») werden.

9.34. Der zweite Punkt besagt, daß das Rückstromproblem in den höheren (mehr angereicherten) Stufen wesentlich anders liegt. Unter der Annahme einer stetigen Stufenoperation sehen wir, daß der Nettobetrag des durch die erste Stufe fließenden Urans mindestens 140mal so groß sein muß wie bei der letzten Stufe. Der strömende Nettobetrag in jeder gegebenen Stufe ist proportional der relativen Konzentration von U-238 und nimmt folglich mit der Anzahl der schon passierten Stufen ab. Da jede gegebene Materialprobe viele Male zurückfließt, ist der Betrag des in jeder Stufe verarbeiteten Materials viel größer als der Nettobetrag des Flusses in dieser Stufe, aber er ist diesem proportional.

9.35. Wir erwähnen diese Punkte, um eine Phase des Separationsproblems zu illustrieren, die nicht von vornherein klar ist, nämlich, daß ein Trennprozeß, der sich für eine frühe Stufe der Trennung am besten bewährt, nicht notwendig auch für späte Stufen der beste sein muß. Faktoren, wie wir sie erwähnt haben, ändern sich nicht nur von Stufe zu Stufe, sondern auch von Prozeß zu Prozeß. So ist zum Beispiel das Rückflußverfahren viel einfacher in einer Diffusionsanlage als in einer elektromagnetischen Anlage. Eine Anlage, die zwei oder mehr Prozesse kombiniert, mag sehr wohl die beste sein, um die notwendige Gesamttrennung durchzuführen. In den unteren (größeren) Stufen mag die Größe der Apparatur und des benötigten Energieaufwandes für die Wahl des Prozesses bestimmend sein. In den höheren (kleineren) Stufen werden diese Faktoren überwogen durch die Bequemlichkeit der Handhabung und den Zeitaufwand für die Beschickung, Umstände, die auf einen anderen Prozeß hinweisen können.

DIE ANLAGEN FÜR SCHWERES WASSER; DIE VERSUCHSANLAGE FÜR ZENTRIFUGEN-TRENNUNG

9.36. Die nächsten beiden Kapitel sind der Beschreibung der drei Methoden gewidmet, die für die Groß-Trennung von Uran-

Isotopen angewendet werden. Es sind die einzigen Isotopen-Trennanlagen, die sich als von größerer Bedeutung für das ganze Unternehmen bis in die Gegenwart erwiesen. In einem früheren Stadium schien es wahrscheinlich, daß die Zentrifuge das beste Verfahren zur Trennung der Uran-Isotopen liefern und daß man schweres Wasser als Bremsstoff benötigen werde. Wir wollen die Versuchsanlagen für Zentrifugen-Trennung und die Anlage zur Erzeugung schweren Wassers kurz beschreiben.

Die Anlagen für schweres Wasser

9.37. Zwei Methoden wurden zur Konzentration von Deuterium benutzt. Dies waren die fraktionierte Wasserdestillation und die Methode der Wasserstoff-Wasser-Austauschreaktion.

9.38. Die erste folgt den gut geklärten Methoden der fraktionierten Destillation mit dem Unterschied, daß eine Destillation von sehr großem Ausmaß erforderlich ist auf Grund der sehr kleinen Differenz der Siedepunkte von leichtem und schwerem Wasser. Aus dem gleichen Grund ist auch der Dampfbedarf sehr groß. Die Methode ist dieser Umstände wegen sehr teuer, aber die Anlagen konnten mit einem minimalen Aufwand von Entwicklungsarbeit errichtet werden. Die du Pont Co. begann im Januar 1943 mit dem Bau; in Gang gesetzt wurden sie etwa im Januar 1944.

9.39. Die zweite Methode für die Herstellung von schwerem Wasser beruht auf dem katalytischen Austausch des Deuteriums zwischen Wasserstoffgas und Wasser. Wenn ein solcher Austausch mit Hilfe von Katalysatoren erreicht ist, erweist sich die Konzentration des Deuteriums im Wasser ungefähr um das Dreifache größer als im Gas, wie wir schon gesehen haben.

9.40. Bei diesem Prozeß wird Wasser in eine Säule eingefüllt und fließt im Gegenstrom zu Wasserstoff und Dampf in einer komplizierten Weise. Am Boden der Säule wird das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff elektrolytisch zerlegt, und der Wasserstoff wird mit Dampf gemischt zum Boden der Säule zurückgeführt. Diese Mischung von Dampf und Wasserstoff passiert durch Schichten von Katalysatoren und sprudelt durch das herunterfließende Wasser. Im wesentlichen konzentriert sich ein

Teil des Deuteriums, das ursprünglich im Wasserstoff enthalten war, im Dampf und wird dann von dem herabfließenden Wasser aufgenommen. Praktisch besteht die Anlage in einer Kaskade von Säulen, von denen die größten an der Eingangsseite des Materials und die kleinsten am Produktionsende stehen. Eine solche Kaskade folgt dem gleichen allgemeinen Prinzip, wie es oben im Zusammenhang mit den Trennproblemen generell dargelegt wurde. Dieser Prozeß verlangt die Versorgung mit sehr aktiven Katalysatoren für die Austauschreaktion. Der wirksamste Katalysator dieses Typus wurde von *H. S. Taylor* von der Princeton-Universität entdeckt, während ein zweiter weniger aktiver Katalysator von *A. von Grosse* gefunden wurde. Bei der Entwicklung dieser Katalysatoren vollzog *R. H. Crist* an der Columbia-Universität die notwendige Bestimmung der physikalischen Konstanten, und *H. R. Arnold* von der Firma du Pont entwickelte einen der Katalysatoren.

9.41. Der Prozeß erwies sich in der Durchführung als ökonomisch. Die Anlagen wurden in den Fabriken der Consolidated Mining & Smelting Co. in Trail, British Columbia (Canada) untergebracht, weil man elektrolytischen Wasserstoff nötig hatte. Der Aufbau der Anlage stand unter der Direktion von *E. V. Murphree* und *F. T. Barr* von der Standard Oil Development Co.

Die Versuchsanlage mit Zentrifugen

9.42. Während langer Zeit wurden in den Anfangstagen der Unternehmung die Gasdiffusionsmethode und die Zentrifugalmethode als zwei für Uran besonders vielversprechende Methoden angesehen. Bei beiden stellten sich für die Anwendung im großen Produktionsmaßstab Schwierigkeiten heraus. Nach der Reorganisation vom Dezember 1941 wurde die Forschungs- und Entwicklungsarbeit an der Zentrifugalmethode an der Universität von Virginia und im Laboratorium der Standard Oil Development Company in Bayway fortgesetzt. Die großen Zentrifugen für extrem hohe Geschwindigkeiten zu entwickeln, war ein Hauptunternehmen der Westinghouse Electric and Manufacturing Company von East Pittsburgh.

9.43. Angesichts des Umfanges der damit verknüpften Inge-

nieurprobleme wurde niemals eine Großproduktionsanlage bewilligt. Aber eine Versuchsanlage wurde genehmigt und in Bayway errichtet. Sie arbeitete erfolgreich und erzielte angenähert den der theoretischen Voraussetzung entsprechenden Grad der Trennung. Später wurde diese Anlage stillgelegt und die Arbeit mit der Zentrifugalmethode unterbrochen. Deshalb werden in diesem Bericht keine weiteren Erörterungen über die Zentrifugalmethode mehr gegeben.

ISOTOPENTRENNUNG IM VERGLEICH ZUR PLUTONIUM-PRODUKTION

9.44. Die wichtigsten Methoden der Isopentrennung, wie sie beschrieben wurden, waren im Prinzip bekannt und praktisch erprobt, noch bevor die Trennung der Uran-Isotopen zu einer Aufgabe von überragender Wichtigkeit wurde. Sie waren auf Uran nicht angewendet worden, mit Ausnahme der Trennung von einigen Mikrogramm, und sie waren auf keine Substanz in einem Umfang angewandt worden, wie er nun verlangt wurde. Aber die Grundfragen betrafen die Kosten, die Wirksamkeit und die Zeit und nicht mehr das Prinzip; mit andern Worten, das Problem war grundsätzlich technischer, nicht wissenschaftlicher Natur. Das Problem der Erzeugung von Plutonium erreichte kein ähnliches Stadium bis nach der Ingangsetzung der ersten selbstlaufenden Kettenreaktionseinheit und der ersten Abtrennung der nach Mikrogramm zählenden Menge von Plutonium. Erst nach diesem Stadium bekamen viele der Versuche, die man im Plutonium-Projekt durchgeführt hatte, vitales Interesse für die militärische Verwendung sowohl bezüglich des U-235 als auch des Plutoniums und für die fernere Entwicklung der Kernenergie. Infolgedessen behielt das Plutonium-Projekt auch weiterhin ein höheres allgemeines Interesse als das Projekt der Isotopen-Trennung. Mancherlei Spezialprobleme ergaben sich aus den Trennarbeiten, die von äußerstem Interesse waren und einen hohen Grad wissenschaftlicher Fähigkeit zu ihrer Lösung beanspruchten, die aber noch geheim gehalten werden müssen. Aus diesen Gründen hat der vorliegende nichttechnische Bericht den ersten Nachdruck auf das Plutonium-Projekt gelegt und wird den

Trenn-Projekten weniger Raum gewähren. Das bedeutet aber nicht, daß das Tennproblem irgendwie leichter zu lösen oder daß seine Lösung von geringerer Wichtigkeit gewesen wäre.

ZUSAMMENFASSUNG

9.45. Mit Ausnahme des elektromagnetischen Trennverfahrens hängt die Isotopentrennung von kleinen Differenzen im durchschnittlichen Verhalten der Moleküle ab. Solche Effekte wurden in sechs «statistischen» Trennmethoden ausgenutzt: 1. Gasdiffusion, 2. Destillation, 3. Zentrifugierung, 4. thermische Diffusion, 5. Austauschreaktion, 6. Elektrolyse. Wahrscheinlich sind nur 1., 3. und 4. für Uran brauchbar; 2., 5. und 6. werden für die Trennung des Deuteriums von Wasserstoff bevorzugt. Bei all diesen «statistischen» Methoden ist der Trennfaktor klein, so daß viele Stufen notwendig sind. Aber bei all diesen Methoden kann man große Materialmengen verarbeiten. Alle diese Methoden waren vor 1940 mit einigem Erfolg erprobt worden; jedoch war keine von ihnen in größerem Umfang benutzt, und keine war auf Uran angewandt worden. Der Produktionsumfang mit elektrischen Methoden war sogar noch kleiner, aber der Trennfaktor war größer. Für die elektromagnetischen Methoden gab es offenbar Grenzen ihres Umfangs. So erschien es vorteilhaft, zwei oder mehrere Methoden zu kombinieren — wegen ihrer Unschiede an Wirksamkeit in verschiedenen Separationsstufen. Die Aufgabe, einige oder alle diese Trennmethoden zu entwickeln, war nicht eine wissenschaftlich-prinzipielle, sondern eine technische hinsichtlich des Umfangs und der Kosten. Über diese Entwicklungen kann deshalb kürzer berichtet werden als über die des Plutonium-Projektes, obgleich sie nicht weniger wichtig sind. Eine Versuchsanlage mit Zentrifugen wurde errichtet und arbeitete erfolgreich. Dagegen wurde keine Großanlage errichtet. Für die Erzeugung von schwerem Wasser wurden Anlagen nach zwei verschiedenen Methoden erstellt.

X. KAPITEL. DIE TRENNUNG DER URAN-ISOTOPEN DURCH GASDIFFUSION

EINFÜHRUNG

10.1. Im Februar 1940 erzielte *A. O. Nier* mit dem Massenspektrometer kleine Mengen konzentrierter Fraktionen der drei Uran-Isotopen mit den Massen 234, 235 und 238. Die Proben wurden *E. T. Booth, A. von Grosse* und *J. R. Dunning* zur Untersuchung mit dem Columbia-Universitäts-Cyclotron übergeben. Sie konnten bald nachweisen, daß U-235 dasjenige Isotop sei, welches sich mit thermischen Neutronen spalten läßt. Es war natürlich, daß diese Forschergruppe unter Leitung von *Dunning* verstärktes Interesse an der Trennung der Uran-Isotope in großem Maßstab gewann.

10.2. Offenbar wurde die Diffusionsmethode zuerst von *Dunning* in einem Memorandum an *G. B. Pegram* ernsthaft in Erwägung gezogen. Das Memorandum wurde im Herbst 1940 an *L. J. Briggs* gesandt. Es faßte vorläufige Untersuchungen zusammen, die von *E. T. Booth, A. von Grosse* und *J. R. Dunning* ausgeführt worden waren. Die Tätigkeit wurde im Jahre 1941 beschleunigt mit finanzieller Hilfe auf Grund eines Kontraktes, den *H. C. Urey* mit der Marine für das Studium der Isotopen-Trennung — insbesondere mit der Zentrifugalmethode — abgeschlossen hatte. Während dieser Zeit schlossen sich *F. G. Slack* von der Vanderbilt-Universität und *W. F. Libby* von der California-Universität der Gruppe an. Ein OSRD-Kontrakt (OEMsr-106), der speziell auf Diffusionsstudien lautete, trat am 1. Juli 1941 in Kraft und lief für ein Jahr. Die Arbeit wurde in immer umfangreicherem Maßstab unter einer Serie von OSRD- und Armee-Kontrakten während des Frühlings 1945 fortgesetzt. Bis Mai 1943 hatte *Dunning* die unmittelbare Leitung dieser Arbeit; *Urey* befaßte sich allgemein mit statistischen Methoden. Von da an bis Februar 1945 hatte *Urey* die unmittelbare Leitung des an der Columbia-Universität ausgeführten Teils der Diffusionsarbeit, gemeinsam mit *Dunning,* der Direktor einer der Hauptabteilungen

war. Am 1. März 1945 ging das Laboratorium der Columbia-Universität an die Carbide and Carbon Chemicals Corporation über. Früh im Jahre 1942 wurde auf Vorschlag von *E. V. Murphree* die M. W. Kellogg Company herangezogen, um Pläne für die Einrichtung einer Diffusionsanlage mit Großproduktion zu entwikkeln und anschließend eine Anlage für Vollproduktion zu bauen. Zur Ausführung dieser Unternehmung wurde eine neue Hilfsgesellschaft, Kellex Corporation genannt, gebildet. Im Januar 1943 wurde der Carbide and Carbon Chemicals Corporation die Verantwortung für die Betriebsleitung übertragen.

10.3. Wie in Kapitel IV festgestellt, war Ende 1941 die Möglichkeit prinzipiell erwiesen, Uran-Hexafluoride mit Hilfe einer einstufigen Diffusionseinheit mit poröser Wand zu trennen (zum Beispiel mit einer Trennwand, hergestellt durch Ätzung einer dünnen Folie von Silberzinklegierung mit Salzsäure). Eine Reihe von Arbeiten über Trennwände und Pumpanlagen wurde durchgeführt, aber man fand keine völlig befriedigende Lösung für einen Betrieb in großem Maßstab. Auch *K. Cohen* hatte mit einer Serie von theoretischen Untersuchungen begonnen, die wir schon erwähnten und die klären sollten, in welcher Weise der Diffusionsprozeß am besten benutzt werden könne, das heißt wieviel Stufen man benötigen werde, welche Gesamtfläche an Trennwänden man brauche, wie groß das zirkulierende Gasvolumen sein müsse usw. Theoretische Studien und Entwicklungsarbeiten von *M. Benedict* lieferten erhebliche Beiträge zu den Kenntnissen auf diesem Gebiet und dienten als Basis für die Planung der großen Produktionsanlage.

10.4. Berichte der Engländer und ein Besuch der englischen Gruppe im Winter 1941/42 klärten eine Anzahl Punkte. Damals planten die Briten selbst eine Diffusions-Trennanlage, so daß die Diskussionen mit *F. Simon, R. Peierls* und anderen besonders wertvoll waren.

DIE PRINZIPIEN DER TRENNUNG DURCH DIFFUSION

Eine einzelne Diffusionsstufe

10.5. Im letzten Kapitel wurde dargelegt, daß die Diffusionsgeschwindigkeit eines Gases durch eine ideale poröse Trennwand

umgekehrt proportional der Quadratwurzel seines Molekulargewichtes ist. Wenn somit ein Gas, das aus zwei Isotopen besteht, anfängt, durch eine Trennwand in ein evakuiertes Gefäß zu diffundieren, so diffundiert das leichtere Isotop (mit Molekulargewicht M_1) schneller als das schwerere (mit Molekulargewicht M_2). Das Resultat, das sich, wenigstens während kurzer Zeit, ergibt, ist, daß die relative Konzentration des leichteren Isotops an der Außenseite der Trennwand größer ist als an der Innenseite. Wenn man aber den Prozeß unbegrenzt lang laufen läßt, wird sich Gleichgewicht einstellen, und die Konzentration wird an beiden Seiten der Trennwand die gleiche sein. Selbst wenn das Diffusatgas (das Gas, das durch die poröse Trennwand hindurchging), durch eine Pumpe abgesaugt wird, wird die relative Menge des durch die Wände tretenden schweren Isotops wachsen, weil das leichte Isotop auf der Innenseite der Barriere durch das frühere Stadium der Diffusion erschöpft wurde.

10.6. Für einen einzelnen Diffusionsvorgang kann der Zuwachs der relativen Konzentration des leichten Isotops im diffundierten Gas im Vergleich zu dem zugeführten Gas durch den Separationsfaktor r oder den Anreicherungsfaktor $r - 1$ ausgedrückt werden. Beide wurden in § 9.8 definiert. Eine ziemlich einfache Gleichung kann abgeleitet werden. Sie drückt $r - 1$ durch die Molekulargewichte und den Bruchteil des ursprünglichen Gases, das diffundiert ist, aus. Wenn dieser Bruchteil sehr klein ist, vereinfacht sich die Gleichung zu $r = \alpha$, dem «idealen Separationsfaktor» des § 9.14. Wenn der diffundierte Bruchteil erheblich ist, zeigt die Gleichung die erwartete Verminderung bei der Trennung. So ist z. B., wenn die Hälfte des Gases diffundiert, $r - 1 = 0{,}69 \cdot (\alpha - 1)$ oder für Uran-Hexafluorid $r = 1{,}003$ im Vergleich zu dem Wert von 1,0043, den man erhält, wenn nur ein sehr kleiner Teil des anfänglichen Gases diffundiert ist.

Die Kaskade

10.7. Für die Trennung der Uran-Isotope sind viele aufeinanderfolgende Diffusionsstufen (das heißt eine Kaskade) nötig, weil für $U^{235}F_6$ und $U^{238}F_6$, das ein zur Urantrennung geeignetes Gas ist, α nur 1,0043 beträgt. Untersuchungen von *Cohen* und anderen zeigten, daß die beste Durchflußanordnung für die auf-

einanderfolgenden Stufen darin besteht, daß jeweils die Hälfte des in jede Stufe gepumpten Gases durch die Trennwand diffundiert, während die andere (verarmte) Hälfte dem Zustrom der nächstunteren Stufe zugeführt wird. Für eine solche Anordnung ist der ideale Trenneffekt zwischen Einfüllgas und Austrittsgas für eine einzelne Stufe $= 0{,}69 \cdot (\alpha - 1)$. Dieser Wert wird häufig mit ε, «Gesamtanreicherung pro Stufe» («overall enrichment per stage») bezeichnet. Für die Uran-Hexafluoride ist theoretisch $\varepsilon = 0{,}003$; aber in der Praxis ist er etwas kleiner durch die Wirkung der «Rückdiffusion», durch unvollständige Mischung auf der Seite des höheren Drucks und durch Fehler in der Trennwand. Die erste experimentelle Trennung der Uran-Hexafluoride (durch *E. T. Booth, H. C. Paxton* und *C. B. Slade*) ergab Resultate, die einem Wert $\varepsilon = 0{,}0014$ entsprachen. Wenn man 99%iges $U^{235}F_6$ erzeugen will und Kaskaden benutzt, deren Stufen jede einen angemessenen Gesamtanreicherungsfaktor hat, dann ergibt sich, daß rund 4000 Stufen nötig sind.

Gaszirkulation in der Kaskade

10.8. Von dem durch die Wand durchgetretenen Gas irgendeiner Stufe tritt nur die Hälfte durch die Trennwand der nächsthöheren Stufe ein, während die andere Hälfte zu einer Vorstufe zurückgeführt wird. Auf diese Weise ist der größte Teil des Stoffes, der am Ende einer Kaskade herauskommt, viele Male umgelaufen. Berechnungen zeigen, daß für eine wirkliche Uran-Trennanlage es nötig sein kann, ein 100 000mal größeres Volumen durch die Wände der ersten Stufe hindurchzuzwingen, als was an der Spitze der Kaskade (in dem gewünschten Produkt $U^{235}F_6$) austritt. Die entsprechenden Ziffern für höhere Stufen fallen rapid ab, weil die Menge des unerwünschten Gases ($U^{238}F_6$), das mitgeführt wird, zurückgeht.

DAS PROBLEM DER TRENNUNG IN GROSSEM MASSTAB

Einführung

10.9. Zur Zeit der allgemeinen Reorganisation des Atombomben-Projektes im Dezember 1941 kannte man die Theorie der

Isotopentrennung durch Gasdiffusion schon gut. Infolgedessen war es möglich, die technischen Probleme festzustellen, auf die man beim Aufbau einer Großproduktions-Trennanlage stößt. Die Entscheidungen über den Umfang und den Ort einer solchen Anlage wurden nicht vor dem Winter 1942/43 getroffen, d. h. ungefähr zu derselben Zeit, als die korrespondierenden Entscheidungen über die Plutonium-Produktionsanlagen getroffen wurden.

Das Ziel

10.10. Das Hauptziel der Gasdiffusions-Großanlage bestand in der täglichen Erzeugung einer bestimmten Anzahl Gramm von Uran, in dem zehnmal soviel U-235 vorhanden ist als in der gleichen Grammzahl natürlichen Urans. Gleichwohl war es klar, daß die Anlage betriebsmäßig ziemlich anpassungsfähig sein müsse und daß beträchtliche Variationen im Grad der Anreicherung und in der Ausbeute des Endproduktes offen bleiben müßten.

Das Betriebsgas

10.11. Uran-Hexafluorid wurde bereits als dasjenige Gas erwähnt, das sich als «Betriebsgas» für eine Anlage eigne; nicht der kleinste seiner Vorteile besteht in dem Umstand, daß Fluor nur ein Isotop hat, so daß die UF_6-Moleküle eines bestimmten Uran-Isotops alle die gleiche Masse haben. Dieses Gas ist hochgradig reaktionsfähig und bei Zimmertemperatur und atmosphärischem Druck tatsächlich ein fester Körper. Infolgedessen wurde die Untersuchung anderer gasförmiger Uranverbindungen als dringliche Aufgabe in Angriff genommen. Um im Falle von Fehlschlägen bei diesem Suchen nach anderen Gasen gesichert zu sein, war es notwendig, die Arbeit mit Uran-Hexafluorid, wie insbesondere die Ausarbeitung von Methoden zu seiner Erzeugung und Zirkulation, fortzusetzen.

Die Anzahl der Stufen

10.12. Die Anzahl der für die Hauptkaskade benötigten Stufen der Anlage hing einzig von dem gewünschten Anreicherungsgrad und dem pro Stufe mit den zur Verfügung stehenden Trennwänden erreichbaren Wert der Gesamtanreicherung ab. Schät-

zungen, die man anstellte, liefen auf einige 1000 Stufen hinaus. Es handelte sich ferner darum, eine «stripping»-Kaskade[1] von einigen hundert Stufen zu haben, bei der die genaue Zahl der Stufen davon abhing, wie weit es sich in ökonomischer Hinsicht vertreten läßt, unabgetrenntes U-235 zu verlieren.

Trennwandfläche

10.13. Wir sahen, daß die Gesamtmenge des durch die Trennwände diffundierten Gases im Vergleich zu dem Volumen des Endproduktes sehr groß ist. Die Geschwindigkeit, mit der das Gas durch eine Flächeneinheit der Trennwand hindurchdiffundiert, hängt von der Druckdifferenz an den beiden Seiten der Trennwand und von ihrer Porosität ab. Selbst wenn man auf der einen Seite vollen Atmosphärendruck und auf der andern Seite den Druck null annimmt und eine optimistische Porositätszahl einsetzt, zeigen die Berechnungen, daß viele acres[2] Trennwand für eine Großerzeugungsanlage notwendig sind.

Entwurf der Trennwand

10.14. Bei Atmosphärendruck ist die mittlere freie Weglänge der Moleküle von der Größenordnung $^1/_{10000}$ mm oder $^1/_{10}$ Mikron. Um einen echten «diffusiven» Strom des Gases zu sichern, muß der Durchmesser der Myriaden von Hohlräumen in der Trennwand kleiner sein als $^1/_{10}$ der freien Weglänge. Infolgedessen darf das Material der Trennwand fast keine Hohlräume besitzen, die merklich größer als 0,01 Mikron ($4 \cdot 10^{-7}$ inch)[3] sind, aber es muß Milliarden von Hohlräumen von dieser oder noch kleinerer Größe besitzen. Diese Hohlräume dürfen sich nicht erweitern oder verstopfen infolge direkter Korrosion oder Korrosionsstaubes, der irgendwie aus dem System stammt. Die Trennwand muß fähig sein, einer Druckdifferenz von einer Atmosphäre zu widerstehen. Sie muß in großen Quantitäten und einheitlicher Qualität fabriziert werden können. Bis Januar 1942 war eine

---

[1] Man kann das vielleicht mit «Abstreifkaskade» übersetzen; gemeint ist eine Anlage, mit der man das Abfallmaterial der Hauptanlage aufarbeitet.

[2] 1 acre = 0,405 ha; 1 ha = 10 000 m^2.

[3] = 10^{-6} cm.

Anzahl verschiedener Trennwände in kleinem Maßstab hergestellt und in bezug auf den Trennfaktor und die Porosität geprüft worden. Einige beurteilte man als recht erfolgversprechend, aber keine einzige war genügend geprüft, um sie in der Großproduktion und in Betrieben zu benutzen.

Bedarf an Pumpen und Energie

10.15. In irgend einer Stufe geht annähernd die Hälfte des in sie eintretenden Materials durch die Trennwand in die nächsthöhere Stufe, während die andere Hälfte zu der nächstniederen zurückgeleitet wird. Die diffundierte Hälfte hat geringeren Druck und muß auf höheren Druck gepumpt werden, bevor sie zur Füllung der nächsten Stufe Verwendung finden kann. Auch der nicht diffundierte Teil kommt mit etwas niedererem Druck heraus, als er eintrat, und kann ohne Kompression nicht in die niederere Stufe nachgefüllt werden. Auf diese Weise muß die gesamte Gasmenge pro Stufe (der doppelte Betrag dessen, was durch die Trennwände geht) mit Hilfe von Pumpen in Zirkulation gesetzt werden.

10.16. Da der durch eine Stufe gehende Gasstrom stark mit der Stellung der Stufe innerhalb der Kaskade variiert, sind auch die Pumpen in Größe oder Anzahl von Stufe zu Stufe verschieden. Die Art und Leistung der für eine bestimmte Stufe benötigten Pumpe hängt nicht nur vom Gewicht des zu bewegenden Gases, sondern auch von der nötigen Druckerhöhung ab. Die damals gemachten Berechnungen nahmen einen Vorwärtsdruck von einer Atmosphäre und einen Rückdruck (das ist der Druck an der Niederdruckseite der Trennwand) von $^1/_{10}$ Atmosphäre an. Man schätzte, daß Tausende von Pumpen und Tausende von Kilowatt zu ihrem Betrieb nötig wären. Da Gaskompression unausweichbar mit Erhitzung verbunden ist, war es klar, daß ein großes Kühlsystem vorgesehen werden müßte. Bis Anfang des Jahres 1942 war ein erheblicher Teil der Vorbereitungsarbeit hinsichtlich der Pumpen getan. Zentrifugalpumpen schienen aussichtsreich trotz der Schwierigkeit, ihre Wellen abzudichten. Trotzdem wurden weitere experimentelle Untersuchungen über vollständig abgedichtete Pumpen verschiedenen Typs in Aussicht genommen.

Undichtigkeiten und Korrosion

10.17. Natürlich mußte das ganze Zirkulationssystem mit seinen Pumpen, Trennwänden, Röhrenleitungen und Ventilen vakuumdicht sein. Wenn irgendein Schmier- oder Dichtungsmittel in den Pumpen nötig war, so durfte es nicht mit dem Gas des Prozesses reagieren. In der Tat durfte keines der im System verwendeten Materialien mit dem Betriebsgas reagieren, weil sonst die Korrosion nicht nur die Trennwände verstopft, eine Reihe von mechanischen Fehlern herbeigeführt, sondern auch eine Absorption, das heißt ein virtuelles Verschwinden des bereits teilweise angereicherten Urans, verursacht hätte.

Die wirkliche Kaskade im Verhältnis zur idealen

10.18. In einer idealen Kaskade wechseln die Anforderungen an die Pumpen von Stufe zu Stufe. In der Praxis ist es unökonomisch, für jede Stufe einen anderen Pumpentypus zu verwenden. Darum muß man bestimmen, wieweit eine Abweichung von der idealen Kaskade (das heißt welches Minimum von Pumpentypen) angebracht ist im Interesse von Wirtschaftlichkeit, Entwurf, Reparatur usw. Dergleichen Kompromisse werden meist auch für andere Bestandteile der Kaskade gemacht.

Beschickung und Anlaufszeit

10.19. Eine Anlage soll, wenn einmal in Gang gesetzt, ohne Störung während einiger Zeit laufen können, bis die Trennung so weit fortgeschritten ist, daß jede Stufe Gas von angemessener Anreicherung enthält. Erst nach Erreichung eines solchen Gleichgewichtszustandes ist es erwünscht, der Schlußstufe etwas von dem gewünschten Produkt zu entnehmen. Sowohl die Menge des betreffenden Materials (die Beschickung) wie auch die dafür benötigte Zeit (die Anlaufzeit) sind groß genug, um in ihrem eigenen Bereich schwerwiegende Probleme aufzugeben.

Wirksamkeit

10.20. Es war klar, daß man nur mit drei Typen von Materialverlust in der betreffenden Anlage rechnen mußte, nämlich: Undichtigkeitsverlust, Korrosionsverlust (das heißt chemische

Verbindungen und Ablagerungen) und Abfallverlust. Man erwartete, daß die Undichtigkeit sehr niedrig gehalten werden könne und daß — nach einer Anfangsperiode des Betriebes — auch der Korrosionsverlust gering werde. Der Prozentsatz des Abfallverlustes würde von der Anzahl der Abstreifstufen[1] abhängen.

Detailfragen

10.21. Noch waren Fragen zu entscheiden, wie hinsichtlich der Art und Weise der Benutzung des Trennwandmaterials (ob in Röhren oder Platten und in großen oder kleinen Einheiten), wie die Mischung durchgeführt werden müsse, und welche Kontrollen und Instrumente nötig seien. Man hatte kaum einen Grund, sie für unbeantwortbar zu halten, aber es war auch nicht zweifelhaft, daß ihre Beantwortung sowohl theoretische wie experimentelle Studien erfordere.

Zusammenfassung des Problems

10.22. Bis zum Jahr 1942 war die Theorie der Isotopentrennung durch Gasdiffusion gut ausgearbeitet, und es wurde klar, daß man eine sehr große Anlage benötigte. Das Wichtigste der Ausrüstung dieser Anlage waren die Diffusionswände und die Pumpen. Weder die Trennwände noch die Pumpen, die damals zugänglich waren, erwiesen sich als völlig geeignet. So war es besonders dringlich, Pumpen und Trennwände weiter zu entwickeln. Auch noch andere technische Probleme waren zu lösen, die mit der Korrosion, der Vakuumdichtung und der Instrumentation zusammenhingen.

ORGANISATION

10.23. Wie im Anfang dieses Kapitels bemerkt, waren die Diffusionsarbeiten von *J. R. Dunning* begonnen worden. Die Arbeiten wurden unter den Auspizien der OSRD an der Columbia-Universität bis zum 1. Mai 1943 fortgeführt. Dann übernahm sie der Manhattan District. Im Sommer 1943 führten Schwierigkeiten, die sich der Lösung gewisser Phasen des Projektes entgegen-

[1] Vgl. Anm. zu 10.12.

stellten, zu einer beträchtlichen Erweiterung, besonders der chemischen Gruppe. *H. C. Urey,* damals Direktor dieser Forschung, bestellte *H. S. Taylor* von der Princeton-Universität zum Mitdirektor (associate director) und fügte *E. Mack jr.* von der Ohio State University, *G. M. Murphy* von der Yale-Universität und *P. H. Emmett* von der Johns Hopkins-Universität dem leitenden Stab bei. Der größte Teil der Arbeit wurde aus den Laboratorien der Columbia-Universität in ein nahegelegenes großes Gebäude übergesiedelt. Den Chemikern an der Princeton-Universität, die sich mit Studien über schweres Wasser befaßt hatten, wurde ein Teil der Trennwandforschungsprobleme zugewiesen. Früh im Jahre 1944 wurde *L. M. Currie* von der National Carbon Company als weiterer Mitdirektor bestellt, um *Urey* in seinem Verbindungs- und Verwaltungswerk zu helfen.

10.24. Früh im Jahre 1942 war, wie erwähnt, die M. W. Kellogg Company ausgewählt worden, um die Großproduktionsanlage zu planen. Hierfür schuf die Kellogg Co. eine besondere Hilfsorganisation, genannt die Kellex Corporation mit *P. C. Leith* als Ausführungsleiter und technischem Chef und, ihm verantwortlich, *A. L. Baker* als Projektdirektor und *J. H. Arnold* als Direktor für Forschung und Entwicklung. Die neue Hilfsgruppe betrieb Forschung und Entwicklung in ihren Laboratorien in Jersey City und in dem Laboratoriumsgebäude, das in dem vorangegangenen Paragraph erwähnt wurde. Sie entwickelte die Betriebs- und Ingenieurpläne, besorgte das Material für die Großproduktionsanlage und überwachte deren Aufbau. Die Anlage wurde errichtet von der J. A. Jones Construction Company, Inc., in Charlotte, North Carolina.

10.24 a. Die Kellex Corporation war, im Gegensatz zu den üblichen industriellen Firmen, eine Gesellschaft von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Verwaltungsfachleuten, die von praktisch allen Industriezweigen herangezogen worden waren zu dem ausdrücklichen Zweck, diese Arbeit vorwärts zu treiben. Der Dienst war freiwillig. Prominente Persönlichkeiten der Industrie verließen aus freien Stücken ihre bisherigen Aufgaben und Verantwortlichkeiten, um ihre ganze Zeit der Kellex-Tätigkeit zu widmen. Nach Vollendung ihrer jeweiligen Aufgaben kehren diese Männer in ihre früheren Stellungen in der Industrie zurück.

10.25. Im Januar 1943 wurde die Carbide and Carbon Chemicals Co. zur Betriebsführung der vollendeten Anlagen bestimmt. Bald begannen deren Ingenieure nicht nur in der Planung und Konstruktion, sondern auch in der Forschung eine große Rolle zu spielen.

FORSCHUNG, ENTWICKLUNG, AUFBAU UND PRODUKTION VON 1942—1945

Erzeugung von Trennwänden

10.26. Bereits vor 1942 waren Trennwände entwickelt worden, von denen man meinte, sie seien zufriedenstellend. Jedoch wurden die zuerst von *E. T. Booth, H. C. Paxton* und *C. B. Slade* entwickelten Trennwände nie in größerem Maßstab benutzt wegen ihrer geringen mechanischen Festigkeit und ihres geringen Korrosionswiderstandes. Im Jahre 1942 wurden unter der allgemeinen Leitung von *Booth* und *F. G. Slack* und unter Mitarbeit von mehreren Wissenschaftlern, darunter *F. C. Nix* von den Bell Telephone-Laboratorien, Trennwände von einer anderen Art erzeugt. Zu einem gewissen Zeitpunkt erachtete man eine von *E. O. Norris* und *E. Adler* entwickelte Trennwand für hinreichend befriedigend, um für den Betrieb vorgesehen zu werden. Andere Trennwände wurden durch Kombination der Ideen verschiedener Männer der Laboratorien der Columbia-Universität (neuerdings SAM-Laboratorien genannt), ferner der Kellex Co., der Bell Telephone-Laboratorien, der Bakelite Corporation, der Houdaille-Hershey Corporation und anderer entwickelt.

Der Trennwandtyp, den man zum Gebrauch in der Betriebsanlage auswählte, wurde unter der allgemeinen Aufsicht von *H. S. Taylor* vervollkommnet. Eine Modifikation dieser Trennwand, die durch die SAM-Laboratorien entwickelt wurde, stellte eine bemerkenswerte Verbesserung der Qualität dar und wurde in einer großen Anzahl Stufen der Anlage verwendet. Im Jahre 1945 war das Problem nicht mehr länger derart, daß nur Minimallösungen erreicht wurden, sondern es handelte sich um Verbesserungen, die eine höhere Entnahmegeschwindigkeit und eine größere Wirtschaftlichkeit des Betriebs erzielen sollten.

10.27. Im ganzen erinnert die Geschichte der Entwicklung der

Trennwände den Verfasser an die Geschichte des Einschalungsproblems beim Plutoniumprojekt. In beiden Fällen wurden die Methoden reichlich ausgekocht und vorprobiert (cut and try) und verschiedene Male wurden befriedigende oder doch nahezu befriedigende Lösungen angekündigt. Aber in beiden Fällen wurde eine tatsächlich befriedigende Lösung erst in der letzten Minute gefunden, und dann stellte sich heraus, daß sie weit besser war, als man gehofft hatte.

Pumpen und Abdichtungen

10.28. Zu Anfang standen die Arbeiten an den Pumpen in weitem Umfang unter der Überwachung von *H. A. Boorse* von der Columbia-Universität. Als die Kellex Co. im Jahre 1942 auf der Bildfläche erschien, übernahmen deren Ingenieure, insbesondere *G. W. Watts, J. S. Swearingen* und *O. C. Brewster,* leitende Positionen in der Entwicklung der Pumpen und der Abdichtung. Ich möchte daran erinnern, daß diese Pumpen unter reduziertem Druck arbeiten müssen, nicht undicht werden dürfen, korrosionsfest sein müssen und dabei ein so kleines Volumen wie möglich einnehmen sollen. Viele verschiedene Typen von Zentrifugal-Gebläsepumpen und Kolbenpumpen (reciprocating-pumps) wurden ausprobiert. In einer der Pumpen für größere Stufen wird der Antrieb durch eine Kuppelung gelenkt, die eine ganz neue und ingenieuse Art von Dichtung enthält. Eine andere Pumpentype ist vollständig eingeschlossen, ihr Zentrifugalantrieb und Rotor wird durch Induktion von außen in Gang gesetzt.

Vermischte Entwicklungen

10.29. Wie beim Plutonium-Problem, so waren auch hier viele Fragen bezgl. Korrosion und dergleichen zu erforschen. Neue Kühlmittel und Schmiermittel wurden von *A. L. Henne* und seinen Mitarbeitern, von *G. H. Cady,* von *W. T. Miller* und seinen Mitarbeitern, von *E. T. McBee* und seinen Mitarbeitern und von Wissenschaftern verschiedener Gesellschaften, darunter der Hooker Electrochemical Co., der du Pont Co. und der Harshaw Chemical Co. entwickelt. Die Koordination von Forschung, Entwicklung und Bedarf der Betriebsanlage bezüglich dieser Mate-

rialien und anderer spezieller Chemikalien geschah durch *R. Rosen,* der zuerst unter dem OSRD und später für die Kellex Co. arbeitete. Methoden zur Vorbehandlung der Oberflächen gegen Korrosion wurden ausgearbeitet. Unter den mancherlei Instrumenten, die für den Gebrauch bei diesem Projekt entworfen oder diesem angepaßt wurden, verdient der Massenspektrograph spezielle Erwähnung. Das Projekt war in der glücklichen Lage, den Beistand von *A. O. Nier,* von der Universität von Minnesota und später bei der Kellex Co., zu haben, dessen Massenspektrograph-Methode für Isotopenanalysen hinreichend fortgeschritten war, um für das Projekt sehr wertvoll zu sein, z. B. hinsichtlich der Analyse von Proben des angereicherten Urans. Massenspektrographen wurden auch benutzt bei Vorprüfungen von Bauteilen auf Vakuumundichtigkeit und zur Entdeckung von Unreinigkeiten im Betriebsgas der Anlage.

PROBEANLAGEN

10.30. Genau genommen gab es keine Probeanlage. Das heißt, man baute kein Trennsystem für kleine Produktion auf, das identische Typen von Gebläsen, Trennwänden, Trennwandeinbauten, Kühlungen usw. benutzte, wie man sie in die Hauptanlage einfügte. Ein solches System konnte man nicht aufbauen, weil verschiedene Teile der Anlage vor dem Zeitpunkt des eigentlichen Baues der Anlage nicht zur Verfügung standen. Unter diesen Umständen mit dem Aufbau der Vollbetriebsanlage voranzuschreiten, das erforderte Voraussicht und Kühnheit.

10.31. Indessen gab es eine ganze Serie von sogenannten Probeanlagen, die dazu dienten, einige Teile oder Gruppen von Teilen der endgültigen Anlage zu prüfen. Probeanlage Nummer 1 war eine zwölfstufige Anlage, ausgerüstet mit einem Typ einer Trennwand, der recht ähnlich derjenigen war, die man bei der Großanlage benutzte; jedoch war das Trennwandmaterial nicht in der für die Anlage bestimmten Form fabriziert, und die benutzten Pumpen waren mit Sylphon[1] abgedichtete Umwälzpum-

[1] Ein Sylphon ist ein biegsames dünnwandiges Metallrohr (die Biegsamkeit ist durch ziehharmonikaartige Form gegeben). Es wird verwendet, um Vakuumapparate-Teile beweglich und doch dicht zu machen, so daß sie sich etwa bis 10 % verlängern und auch beträchtlich biegen lassen.

pen, nicht Zentrifugalpumpen. Arbeiten mit dieser Anlage im Jahre 1943 erprobten nicht nur die Trennwände und das allgemeine Trennsystem, sondern lieferten Informationen über die Regulierventile, die Druckmesser, Röhren usw. Versuchsanlage Nummer 2, eine vergrößerte Ausgabe von Nummer 1, jedoch mit nur sechs Stufen, wurde im Spätjahr 1943 und im Frühjahr 1944 hauptsächlich als Prüfeinheit für die Instrumente benutzt. Probeanlage Nummer 3a mit Zentrifugalgebläsen und Diffusorattrappen war gleichfalls in erster Linie zur Instrumentenprüfung bestimmt. Versuchsanlage Nummer 3b war eine richtige Versuchsanlage für einen besonderen Teil der Großbetriebsanlage. Versuchsanlagen mit voller Ausrüstung auf dem Baugrund des Werkes zeigten die Vakuumdichte, den Korrosionswiderstand und die allgemeine Betriebsfähigkeit der Ausrüstung.

Anlage-Genehmigung

10.32. Im Dezember 1942 wurde die Kellogg Company beauftragt, den vorläufigen Entwurf der Anlage voranzutreiben, und im Januar 1943 wurde die Genehmigung zum Bau erteilt.

Der Bauplatz

10.33. Wie in einem früheren Kapitel dargelegt, wurde anfangs für alle Anlagen des Manhattan Districts ein Bauland in Tennessee Valley gewählt. Jedoch wurde die Plutoniumanlage tatsächlich an anderer Stelle erbaut. An Ort und Stelle blieb die bereits beschriebene Plutoniumversuchsanlage, die Gasdiffusionsanlage, die elektromagnetische Trennanlage (siehe Kap. XI) und später die thermische Diffusionsanlage, die alle im Tennessee Valley auf dem Clinton-Bauplatz errichtet wurden, der offiziell als Clinton Engineer Works bekannt ist.

10.34. Dieses Baugelände wurde von Colonel *Marshall,* Colonel *Nichols* und Vertretern der Stone and Webster Engineering Corporation im Juli 1942 geprüft, und seine Erwerbung wurde empfohlen. Die Empfehlung wurde durch das OSRDS-1-Exekutivkomitee an einer Sitzung im Juli 1942 gutgeheißen. Die endgültige Zustimmung erteilte Generalmajor *L. R. Groves* nach persönlicher Besichtigung des 70 Quadratmeilengeländes. Im Sep-

tember 1942 unternahm man die ersten Schritte, das Gelände zu erwerben, das am Clinch-Fluß ungefähr 30 km von Knoxville, Tennessee, entfernt liegt und schließlich 70 Quadratmeilen erheblich überschritt. Die Plutoniumversuchsanlage ist in einem Tal untergebracht, die elektromagnetische Trennanlage in einem anliegenden Tal und die Diffusionstrennanlage in einem dritten.

10.35. Obwohl die Entwicklung der Anlage und des Baugeländes in Hanford sehr eindrucksvoll ist, steht sie ganz unter einer Gesellschaft mit nur einer Betriebsart, so daß sie in gewisser Hinsicht weniger interessant ist als Clinton mit seiner großen Vielfalt von Tätigkeitsrichtungen. Eine Beschreibung des Clintongeländes zu geben, das ein großes Aufgebot neuer Anlagen, neuer Wohndistrikte, neuer Theater, neuer Schulanlagen, Schlammseen, Dunstwolken und eine allgemeine Unruhe darbietet, überschreitet den Bereich dieses Berichtes.

Daten des Baubeginns

10.36. Am 1. Juni 1943 begann man mit der Errichtung der Dampfkraftanlage für die Diffusionsanlage. Es handelt sich um eine der größten derartigen Kraftanlagen, die jemals gebaut wurden. Die Errichtung anderer Hauptgebäude und Betriebsanlagen begann zwischen dem 29. August 1943 und dem 10. September 1943.

Betrieb

10.37. Ungleich Hanford besteht die Diffusionsanlage aus so vielen mehr oder weniger voneinander unabhängigen Einheiten, daß sie Sektion nach Sektion in Betrieb gesetzt wurde, so wie es der Fortschritt in Bau und Prüfung erlaubte. So gab es kein dramatisches Eröffnungsdatum, noch einen unangenehmen Zwischenfall, der es kennzeichnet. Vor Sommer 1945 war die Anlage in erfolgreichem Betrieb.

10.38. Für die Männer, die sich mit der Gasdiffusion beschäftigten, war es ein weiter Weg von 1940 bis 1945, und er war nicht erhellt durch derartige aufregende Marksteine auf halbem Wege, wie die erste Kettenreaktionseinheit in Chicago es war. Vielleicht noch mehr als jede andere Gruppe in dem Projekt verdienen diejenigen, die an der Gasdiffusion arbeiteten,

Anerkennung für ihren Mut, ihre Ausdauer, wie gleicherweise für ihre wissenschaftliche und technische Tüchtigkeit. Aus Sicherheitsgründen waren wir nicht imstande zu sagen, wie sie ihre Probleme lösten — ja in manchen Fällen mehrere Lösungen fanden als Garantie gegen einen Fehlschlag in der Anlage. Es ist eine bemerkenswerte Leistung gewesen. In den fünf Jahren gab es auch Perioden von Entmutigung und Pessimismus; jetzt sind sie fast vergessen, da die Anlage nicht nur arbeitet, sondern dauernd und zuverlässig funktioniert und mit einer Leistung, die die Erwartungen übertrifft.

ZUSAMMENFASSUNG

10.39. Die Arbeit über die Trennung der Isotopen durch Gasdiffusion begann im Jahre 1940 an der Columbia-Universität, und bis Ende 1942 war das Problem einer Urantrennung in großem Maßstab durch diese Methoden gut festgelegt. Da der Betrag der Trennung, der durch eine einzige Stufe erzielt werden kann, sehr klein ist, waren mehrere tausend aufeinanderfolgende Stufen nötig. Es ergab sich, daß die beste Methode der Verbindung der vielen benötigten Stufen ein ausgedehntes Rückflußsystem erforderte, so daß Tausende Male mehr Material durch die Trennwände der unteren Stufen passieren muß, als schließlich als Endprodukt der höchsten Stufe in Erscheinung tritt.

10.40. Das Hauptproblem war die Entwicklung befriedigender Trennwände und Pumpen. Ganze Hektaren von Trennwänden und Tausende von Pumpen wurden benötigt. Das gegebene Betriebsgas war Uran-Hexafluorid, das aber für Erzeugung und Handhabung so große Schwierigkeiten bot, daß man nach anderen Möglichkeiten forschte. Da ein großer Teil der Trennung bei Unterdruck durchgeführt werden mußte, stellten sich Probleme der Vakuumtechnik, und zwar in einem bis dahin unerhörten Umfang. Viele Aufgaben der Instrumentierung und Regulierung wurden gelöst; umfangreicher Gebrauch von verschiedenen Formen der Massenspektrographie wurde gemacht.

10.41. Die Forschung wurde hauptsächlich an der Columbia-Universität unter *Dunning* und *Urey* durchgeführt. 1942 wurde die M. W. Kellogg Company beauftragt, Verfahren, Ausrüstung

und Werkplanung zu entwickeln, und sie gründete zu diesem Zweck die Kellex Corporation. Die Anlage wurde von der *J. A. Jones* Construction Company errichtet. Als Betriebsgesellschaft wurde die Carbide and Carbon Chemicals Corporation ausgewählt.

10.42. Man entwickelte eine sehr zufriedenstellende Art von Trennwand, obwohl die endgültige Wahl ihrer Type nicht zustande kam, bevor der Bau der Anlage in den Clinton Engineer Works in Tennessee in vollem Gang war. Zwei Typen von Zentrifugalgebläsen wurden entwickelt bis zu einem Punkt, wo sie die Pumpaufgaben erfüllen konnten. Die Anlage wurde vor Sommer 1945 in erfolgreichen Betrieb gesetzt.

XI. KAPITEL. ELEKTROMAGNETISCHE TRENNUNG VON URAN-ISOTOPEN

EINFÜHRUNG

11.1. In Kapitel IV wurde ausgesprochen, daß die Möglichkeit einer Trennung der Uran-Isotope in großem Maßstab durch elektromagnetische Mittel im Herbst 1941 von *E. O. Lawrence* von der Universität von Californien und *H. D. Smyth* von der Princeton-Universität vermutet worden war. In Kapitel IX beschrieben wir die Prinzipien einer Methode der elektromagnetischen Trennung und registrierten die drei Begrenzungen dieser Methode: die Schwierigkeit der Ionenerzeugung, der begrenzte Bruchteil der praktisch nutzbaren Ionen und die Raumladungseffekte.

11.2. Als gegen Ende 1941 die Reorganisation des ganzen Uranprojektes durchgeführt wurde, hatte *Lawrence* bereits einige Proben von getrennten Uran-Isotopen erzielt und war nach erfolgter Reorganisation offiziell mit der Herstellung weiterer Proben und der Durchführung verschiedener damit verknüpfter physikalischer Messungen beauftragt worden. Jedoch ebenso wie das Metallurgische Laboratorium sein Ziel sehr bald von der Physik der Kettenreaktion auf die Großproduktion von Plutonium verlagerte, änderte auch die Abteilung *Lawrence* sofort ihr Programm und richtete es auf die Trennung von Uran-Isotopen mit elektromagnetischen Methoden in großem Maßstab. Dieser Zielwechsel wurde beschleunigt durch den Erfolg der Anfangsexperimente an der Universität von Californien und durch die Entwicklung von Ideen über andere mögliche Methoden an den Universitäten von Californien und Princeton. Von den zahlreichen vorgeschlagenen elektromagnetischen Entwürfen wurden bald drei als am meisten versprechend erkannt: der «Calutron»-Massentrenner, der Trenner nach dem Magnetrontypus, der später zur «Ionenzentrifuge» entwickelt wurde, und die «Isotron»-Methode, Ionenstrahlen zu «Bündeln» zu vereinigen. Die ersten

beiden dieser Möglichkeiten wurden an der Universität von Californien verfolgt und die dritte in Princeton. Nach den ersten paar Monaten wurde die bei weitem größte Anstrengung auf das Calutron verwandt, aber auch für die Ionenzentrifuge wurde an der Universität von Californien während des Sommers 1942 die Arbeit in einem gewissen Umfange fortgesetzt, und sie wurde dann von *J. Slepian* in den Westinghouse-Laboratorien in Pittsburgh während des Winters 1944/45 in beschränktem Umfang weitergeführt. Die Arbeit am Isotron wurde in Princeton bis Februar 1943 fortgesetzt, zu welcher Zeit dem größten Teil der Forschungsgruppe andere Arbeit zugewiesen wurde. Dieses Kapitel befaßt sich hauptsächlich mit dem Calutron als derjenigen Methode, die zu einer Großproduktion von U-235 geführt hat. Eine kurze Beschreibung soll auch der thermischen Diffusionsanlage gewidmet sein, die man errichtete, um die elektromagnetische Anlage mit angereichertem Material zu versorgen.

11.3. Sicherheitsbedürfnisse machen es hier unmöglich — ebenso wie für andere Teile des Projektes —, viele der interessantesten technischen Einzelheiten vorzulegen. Die Bedeutung der Entwicklung ist beträchtlich größer als der Platz, den wir ihr hier einräumen können, andeutet.

ELEKTROMAGNETISCHE MASSENTRENNER

Vorbereitende Arbeit

11.4. Der Massenspektrograph von *A. O. Nier* war ursprünglich zu dem Zweck aufgebaut worden, um die relative Häufigkeit der Isotopen zu messen und nicht, um größere Mengen von Proben zu trennen. Unter Benutzung von dampfförmigem Uran-Bromid hatte *Nier* einige kleine Proben von getrennten Uran-Isotopen hergestellt. Aber seine Produktionsgeschwindigkeit war in der Tat winzig, da sein Ionenstrom weniger als ein Mikroampère erreichte. (Ein Massenspektrograph, in dem ein Mikroampère von normalen Uran-Ionen durch die Trennfelder zu Kollektoren wandert, ergibt ungefähr ein Mikrogramm U-235 in einem 16stündigen Tagesbetrieb.) Früh erkannte *Lawrence* das starke Bedürfnis nach Proben von angereichertem U-235 für Kernstudien, und er entschied sich, zu prüfen, was man mit

Hilfe des 37zölligen (Cyclotron)-Magneten[1] in Berkeley in dieser Richtung anfangen könne. Die Anfangsstadien seiner Arbeit wurden durch eine Schenkung der Forschungsgesellschaft von New York unterstützt, die später zurückgezahlt wurde. Vom 1. Januar 1942 an wurde der gesamte Aufwand vom OSRD vermittelst des S-1-Komitees getragen. Später wurden wie in andern Teilen des Uran-Projektes die Kontrakte vom Manhattan District übernommen.

11.5. In Berkeley wurde nach einigen Wochen der Vorbereitung das 37zöllige Cyclotron am 24. November 1941 abmontiert und sein Magnet zur Erzeugung des magnetischen Feldes in dem Apparat benutzt, dem man den Namen Calutron gab (ein Name, der eine Zusammenziehung der Worte «California University cyclotron» darstellt). Man richtete eine Ionenquelle ein, die aus einem Elektronenstrahl bestand, der den Dampf von Uransalz durchquerte — analog der Ionenquelle der Zeichnung in Kap. IX, S. 197. Die Ionen wurden dann beschleunigt, passierten den Schlitz S_2 und traten in den Trennraum, wo das magnetische Feld sie zwang, im Halbkreis zu dem Sammlerschlitz zu wandern. Bis zum Dezember 1941 erhielt man molekulare Ionenstrahlen von Restgas, und kurz darauf wurde der aus einzelnen geladenen Uran-Ionen (U^+) bestehende Strahl auf eine beträchtliche Stärke gesteigert. Man fand, daß ein beträchtlicher Bruchteil der aus der Quelle stammenden Ionen U^+-Ionen sind. Zum Zweck der Prüfung der verschiedenen getrennten Proben installierte man einen Sammler mit zwei Taschen, die durch eine Distanz getrennt waren, welche den Massenzahlen 235 und 238 entsprach. Zwei kleine Anhäufungsexperimente mit U^+-Strahlen von geringer Stärke wurden im Dezember durchgeführt, aber die darauffolgende Analyse der Proben zeigte nur einen kleinen Trennfaktor. Mitte Januar 1942 wurde ein Probelauf mit einer beträchtlichen Stärke des Strahls und einem damit verbundenen Strom oder Durchgang von beträchtlicher Höhe durchgeführt, der einen wesentlich verbesserten Trennfaktor zeigte. Anfang Februar 1942 erhielt man sehr viel stärkere Strahlen und *Lawrence* berichtete, daß damit gute Trennfaktoren erreichbar seien. Bis Anfang März 1942 war der Ionenstrom noch weiter gestei-

[1] Das Maß 37 Zoll, etwa 94 cm, bedeutet den Poldurchmesser.

gert worden. Diese Ergebnisse wiesen auf Erfüllung einer Hoffnung hin, die *Lawrence* hegte, daß die Raumladung durch Ionisation des Restgases in der Magnetkammer neutralisiert werden könne.

Aufstellung eines Grossprogramms

11.6. Damals wurde es klar, daß ein Calutron möglicherweise geeignet sei, Trennung in weit größerem Umfang, als man es je mit einer elektromagnetischen Methode erreicht hatte, durchzuführen. Offenbar war es wünschenswert, das ganze Gebiet der elektromagnetischen Trennung zu durchforschen. Mit diesem Ziel im Auge mobilisierte *Lawrence* seine Gruppe im Strahlungslaboratorium der Universität von Californien in Berkeley und wandte sich an andere um Hilfe. Unter denen, die von Anfang an in Berkeley waren, befanden sich *D. Cooksey, P. C. Aebersold, W. M. Brobeck, F. A. Jenkins, K. R. MacKenzie, W. B. Reynolds, D. H. Sloan, F. Oppenheimer, J. G. Backus, B. Peters, A. C. Helmholz, T. Finkelstein* und *W. E. Parkins jr. Lawrence* rief einige seiner früheren Schüler zurück, darunter *R. L. Thornton, J. R. Richardson* und andere. Unter denen, die während unterschiedlicher Zeiten in Berkeley arbeiteten, waren *L. P. Smith* von der Cornell-Universität, *E. U. Condon* und *J. Slepian* von der Westinghouse Co., und *I. Langmuir* und *K. H. Kingdon* von der General Electric Co. Während dieser frühen Periode war auch *J. R. Oppenheimer* noch in Berkeley und trug einige wichtige Ideen bei. Im Herbst 1943 wurde die Gruppe weiter verstärkt durch die Ankunft einer Anzahl von englischen Physikern unter der Leitung von *M. L. Oliphant* von der Universität von Birmingham.

11.7. Im Anfang wurde eine große Anzahl verschiedener Methoden ins Auge gefaßt und viele Erkundungsexperimente durchgeführt. Die Hauptanstrengung wurde gleichwohl schon bald auf die Entwicklung des Calutrons gerichtet mit dem Ziel eines hohen Trennfaktors und einer starken Stromstärke des positiven Ionenstrahls.

Unmittelbare Ziele

11.8. Von den drei im ersten Paragraphen verzeichneten scheinbaren Grenzen — Schwierigkeiten der Ionenerzeugung, be-

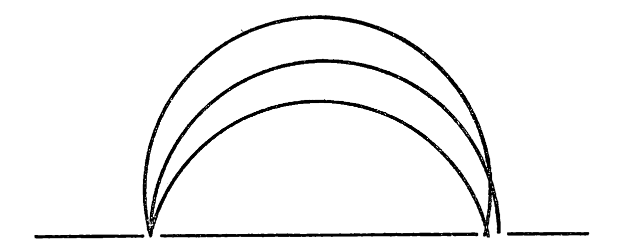
grenzter Bruchteil der praktisch nutzbaren Ionen und Raumladungseffekte — hatte nur die letztere dem ersten Ansturm nachgegeben. Die Raumladung in der Nachbarschaft eines positiven Ionenbündels konnte offenbar in einem sehr großen Umfang vernichtet werden. So blieben als unmittelbare Ziele eine produktivere Ionenquelle und eine bessere Ausnutzung der Ionen.

11.9. Die Faktoren, welche die Wirksamkeit einer Ionenquelle bestimmen, sind zahlreich. Sowohl der Entwurf der Ionenquelle selbst wie die Methode, aus ihr die Ionen herauszuholen, kommen dabei in Frage. Die zu lösenden Probleme können nicht einfach formuliert werden und müssen durch im wesentlichen empirische Methoden in Angriff genommen werden. Selbst wenn die Sicherheitsbeschränkungen eine Darlegung der unzähligen Formen von Ionenquellen und Beschleunigungssystemen, die man versucht hat, gestatten würden, wäre eine solche Darlegung hier doch zu sehr technischer Natur.

11.10. Gehen wir zu dem Problem der besseren Ausnützung der Ionen über, so müssen wir das Prinzip der Arbeitsweise des Calutrons genauer ins Auge fassen. Das Calutron beruht auf der Tatsache, daß einfach geladene Ionen während ihrer Bewegung durch ein gleichförmiges magnetisches Feld senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung in kreisförmige Bahnen abgelenkt werden, deren Radius zu ihren Impulsen proportional[1] ist. Betrachten wir jetzt nur ein einzelnes Isotop, dann wird klar, daß die durch die beiden Schlitze hindurchtretenden Ionen (die so in den großen evakuierten Raum treten, in dem das magnetische Feld wirksam ist) nicht von Anfang an einer einzigen Bahnrichtung folgen, sondern viele Anfangsrichtungen besitzen, die innerhalb eines kleinen Winkels liegen, dessen Größe von der Weite des Schlitzes abhängt. Da indessen alle Ionen des fraglichen Isotops Kurven von gleichem Durchmesser durchlaufen, haben glücklicherweise die in leicht verschiedenen Richtungen startenden Ionen die Tendenz, sich wieder zu vereinigen — oder sich nahezu wieder zu vereinigen — nachdem sie einen Halbkreis durchlaufen haben. Man bringt den Kollektor selbstverständlich an dieser Stelle der Wiedervereinigung an. Natürlich verhalten sich Ionen

[1] $r = \frac{mv}{eH}$

eines anderen Isotops (zum Beispiel Ionen von der Masse 238 statt 235) ähnlich, ausgenommen daß sie Halbkreisbahnen von leicht verschiedenem Durchmesser durchlaufen. Die Proben der beiden Isotopen werden an den beiden verschiedenen Stellen der Wiedervereinigung in Kollektoren aufgefangen. Nunmehr kann die Ausnützung eines größeren Bruchteils der ursprünglich erzeugten Ionen leicht genug durchgeführt werden, indem man die beiden bezüglichen Schlitze erweitert. Es ist indessen nicht leicht,



die Schlitze zu einer einigermaßen großen Ausdehnung zu erweitern, ohne die Schärfe des Fokus an der Wiedervereinigungsstelle zu opfern. Tatsächlich kann man nur durch sorgfältig proportionierte Lageänderung in der magnetischen Feldstärke zum Ziele kommen. Glücklicherweise konnten die entsprechenden Änderungen erfolgreich ausgearbeitet werden.

11.11. Ein anderes Problem, nicht so dringlich, aber nichtsdestoweniger als wichtig für jede Produktionsanlage erkannt, war das einer wirkungsvolleren Ausnutzung des magnetischen Feldes. Da starke Magnete in Bau und Betrieb teuer sind, zog man natürlich die Benützung des gleichen magnetischen Feldes für mehrere Ionenbündel in Betracht. Die experimentelle Durchführung solcher wirtschaftlicher Pläne wurde zu einer Hauptaufgabe des Laboratoriums.

Der Riesenmagnet

11.12. Obwohl das Ausmaß der Trennung, das man gegen März 1942 erreicht hatte, viel größer war als irgendetwas, was vorher mit einem elektromagnetischen Massentrenner geleistet worden war, blieb dieser Umfang doch noch sehr weit von dem benötig-

ten entfernt, um Mengen von Material zu erzeugen, die militärische Bedeutung haben könnten. Die dargelegten Probleme mußten nicht nur prinzipiell gelöst werden, sie mußten in einem großen Maßstab gelöst werden. Der 37-Zoll-(94 cm) Cyclotron-Magnet, den man benutzt hatte, war wohl fähig, wichtige Informationen zu liefern, aber eine größere Apparatur war erwünscht. Zum Glück stand in Berkeley ein viel größerer Magnet, der für ein Riesencyclotron bestimmt war, in Bau. Dieser Magnet mit einem Poldurchmesser von 184 Zoll (ungefähr 467 cm) und einem Polabstand von 72 Zoll (etwa 183 cm) sollte der größte existierende werden. Sein Bau, durch den Krieg unterbrochen, war immerhin bereits hinreichend vorangeschritten, so daß er in wenigen Monaten vollendet werden konnte, wenn man die nötigen Prioritätsrechte erhielt. Abgesehen vom Magneten selbst waren die damit verknüpften Bauten, Laboratorien, Werkstätten usw. nahezu ideal für die Entwicklung des Calutrons; unnötig zu sagen: die Arbeit mit dem Riesenmagneten wurde wieder aufgenommen, und gegen Ende 1942 war er gebrauchsfertig.

(Hierzu folgende Fußnote im englischen Text:) Die Konstruktion des Riesencyclotrons war mit privaten Mitteln in Angriff genommen worden, in reichem Maße zur Verfügung gestellt von der Rockefeller-Stiftung, vermehrt durch Schenkungen der Forschungsgesellschaft, der John and Mary Markel-Stiftung und der Universität von Californien. Um den Bau so rasch wie möglich zu betreiben, waren Überstunden nötig, und das bedingte zusätzliche Kosten. Um sie zu decken, gab die Rockefeller-Stiftung einen Extrazuschuß.

Entwicklung bis zum September 1942

11.13. Die ersten Experimente unter Benutzung des 37-Zoll-Magneten sind in einem vorhergehenden Paragraphen beschrieben. Die weiteren Entwicklungen vollzogen sich hauptsächlich nach folgenden zwei Richtungen: Bau und Installation einer richtig durchkonstruierten Trenneinheit für den 37-Zoll-Magneten, und Entwurf und Bau von experimentellen Trennungseinheiten zur Anwendung im Großmagneten.

11.14. Abgesehen vom allmählichen Fortschritt in der Verstärkung des Ionenbündels und des Trennfaktors, die das Resultat einer Serie von Entwicklungsarbeiten an der Ionenquelle und dem Beschleunigungssystem bildete, erfüllte sich die Hoffnung

auf Verbesserung der Ionenausnützung während des Sommers 1942 bei Benützung des Riesenmagneten. Es wurde außerdem möglich, mehr als einen Ionenstrahl in der gleichen magnetischen Trennzone aufrechtzuerhalten. Immerhin stießen Experimente über dieses letztere Problem auf gewisse Schwierigkeiten, und man gewann den Eindruck, daß es hinsichtlich der Anzahl der Quellen und Auffänger, die man in einer einzelnen Einheit unterbringen könne, Grenzen gebe, ebenso wie hinsichtlich des Stroms, der in jedem Strahl ohne Schädigung der Trennung benutzt werden kann.

11.15. Es lag klar, daß viele Trenneinheiten notwendig wären, um eine Produktionsmenge von militärischer Bedeutung zu erreichen. Infolgedessen zog man verschiedene Systeme mit kombinierten Gruppen von Einheiten in wirtschaftlicher Anordnung in Betracht. Es wurde ein Schema ausgearbeitet, das später in den Produktionsanlagen Anwendung fand und dort zufriedenstellende Ergebnisse zeitigte.

Vorteile des elektromagnetischen Systems

11.16. Im September 1942 hatten sowohl die Gasdiffusionsmethoden wie die Zentrifugalmethoden der Uran-Isotopentrennung unter intensivem Studium gestanden — und zwar schon längere Zeit, als das bei der elektromagnetischen Methode zutraf. Beide Methoden — Gasdiffusion und Zentrifuge — schienen für eine Großproduktion von U-235 durchführbar, aber beide erforderten Hunderte von Stufen für eine Trennung in großem Maßstab. Keine davon hatte irgendwo erhebliche Mengen von abgetrenntem U-235 erzeugt. Keine Großproduktionsanlage für Plutonium war in Aufbau, und die selbständig ablaufende Kettenreaktion zur Plutoniumerzeugung hatte sich noch nicht als durchführbar erwiesen. Aber bezüglich der elektromagnetischen Methode stand nach der erfolgreichen Trennung von Milligramm-Beträgen die wissenschaftliche Durchführbarkeit nicht mehr in Frage. Wenn eine Einheit am Tage 10 mgr lieferte, konnten 100 000 000 Einheiten eine Tonne pro Tag abtrennen. Das war eine Frage der Kosten und der Zeit. Jede Einheit mußte eine komplizierte elektromagnetische Anlage werden mit Hochvakuum,

Hochspannung und starken magnetischen Feldern. Und es würde eines großen Aufwands an Forschungen und Entwicklungsarbeit bedürfen, bevor man imstande wäre, vollständige Großanlagen aufzubauen. Viele erfahrene Techniker würden voraussichtlich nötig sein. Im ganzen betrachtet, sah die Sache damals sehr kostspielig aus, aber zugleich sicher und relativ bald durchführbar. Noch mehr: die Kleinheit der Einheiten hatte den Vorteil, daß man mit der Entwicklungsarbeit fortfahren, Modifikationen während der Bauzeit oder in gewissen Grenzen sogar nach dem Bau anbringen und die Leistung jederzeit durch den Bau neuer Einheiten vergrößern konnte.

Fragen des weiteren Vorgehens

11.17. Auf Grund von ziemlich unvollständigen wissenschaftlichen und technischen Informationen über alle Methoden und auf Grund von gleichfalls zweifelhaften Kostenschätzungen mußten Entscheidungen getroffen werden über drei Punkte: 1. soll man eine elektromagnetische Anlage bauen? 2. wie groß sollte die Anlage sein? 3. bei welchem Grade der Entwicklung soll der Entwurf festgelegt werden?

Genehmigung des Baues einer Anlage

11.18. Auf Grund des Berichtes über die Resultate der Berkeley-Versuche im Sommer 1942 empfahl das S-1-Exekutivkomitee an einer Sitzung vom 13. und 14. September 1942 in Berkeley, daß seitens der Armee Zahlungen geleistet werden sollten für eine auf dem Bauplatz in Tennessee Valley (Clinton Engineer Works) zu erstellende elektromagnetische Trennanlage. Es wurde ferner empfohlen, daß bestimmt werden sollte, daß Zuweisungen für diese Anlage auf Grund von späteren Informationen gestrichen werden könnten. Es wurde empfohlen, so schnell wie möglich auf dem Tennessee Valley Bauplatz eine Versuchsanlage zu errichten (jedoch wurde diese Empfehlung später zurückgezogen, und die Versuchsanlage wurde nie gebaut). Die Errichtung einer Betriebsanlage wurde am 5. November 1942 von General *Groves* genehmigt mit der Weisung, daß der Entwurf für die ersten Einheiten unverzüglich festzulegen sei.

Organisation für Planung und Aufbau

11.19. Bei der Beschreibung der Plutoniumproduktion erörterten wir die Teilung der Verantwortlichkeit zwischen dem Metallurgischen Projekt und der du Pont Company. Die elektromagnetische Trennanlage wurde unter einem etwas abweichenden Organisationsschema geplant und gebaut. Die Verantwortlichkeit wurde auf sechs Hauptgruppen verteilt. Das Strahlungs-Laboratorium an der Universität von Californien war verantwortlich für Forschung und Entwicklung, die Westinghouse Electric and Manufacturing Company für die die Herstellung der mechanischen Teile, das heißt Stromquellen, Empfänger, Pumpen, Behälter usw., die General Electric Company für die elektrische Ausrüstung und Regulierung, die Allis-Chalmers Company für die Magneten, die Stone and Webster Engineering Company für Bau und Montage und die Tennessee Eastman Company für den Betrieb. Alle fünf Industriekonzerne unterhielten in Berkeley Gruppen von betriebseigenen Ingenieuren, so daß ein System häufiger zwangloser Zusammenkünfte und wechselseitigen Austauschs zustande kam. Auf diese Weise kam der Hauptteil der Planung kooperativ in einer einzigen Gruppe zustande, obgleich die Einzelheiten den Stammbüros der verschiedenen Gesellschaften überlassen blieben.

Die Basis der technischen Entscheidungen

11.20. Seltsam genug, obwohl die Theorie der selbständigen Kettenreaktionseinheit bereits gut ausgearbeitet ist, blieb die Theorie der Gasentladungen, nach 50 Jahren intensiver Studien, immer noch unzulänglich für die exakte Voraussage des Verhaltens der Ionen in einem Calutron. Der Betrag von U-235, den man pro Tag ansammeln kann, und die Reinheit dieses Materials hängen von vielen Faktoren ab, darunter: 1. Breite, Anordnung und Gestalt des Kollektors, 2. Druck im Magnetraum, 3. Stärke und Einheitlichkeit des Magnetfeldes, 4. Gestalt und Anordnung der begrenzenden Schlitze und des Beschleunigungssystems, 5. beschleunigende Spannung, 6. Größe und Form des Schlitzes in der Lichtbogenquelle, von der die Ionen kommen, 7. Stromstärke im Bogen, 8. Stellung des Bogens in der Lichtbogenkammer, 9. Gas-

druck in der Lichtbogenkammer, 10. chemische Natur des Gases. Natürlich stand für ein systematisches Studium aller möglichen Kombinationen der Variablen keine Zeit zur Verfügung. Die Entwicklung mußte hauptsächlich intuitiv geschehen. Es galt, eine Vielfalt von Bedingungen zu studieren und eine Anzahl von Teildeutungen zu machen. Sodann mußte die gesammelte Erfahrung der Gruppe, das Gesamt«gefühl» für die Problemlage (the «feel» of the problem), in spezielle Planungen und Vorschläge übertragen werden.

Die notwendigen technischen Entscheidungen

11.21. a) *Anzahl der Stufen.* Wie bei allen Methoden mußte zwischen der Ausbeute und dem Trennfaktor ein Kompromiß geschlossen werden. Beim elektromagnetischen System ist der Trennfaktor viel höher als bei anderen Systemen, so daß die Zahl der benötigten Stufen klein ist. Es bestand die Möglichkeit, daß eine einzige Stufe genügen könnte. Frühe Studien zeigten, daß Versuche, den Trennfaktor so hoch zu treiben, daß man mit einer Stufe auskäme, die Ausbeute auf einen unpraktischen kleinen Betrag herabsetzten.

11.22. b) *Einzelheiten.* Die Informationen und Erfahrungen, die man über die Variablen wie die oben erwähnten erworben hatte, mußten zu Entscheidungen in den folgenden hauptsächlichen Punkten benutzt werden, bevor mit dem Entwurf wirklich begonnen werden konnte: 1. die Größe einer Einheit, wie sie durch den Krümmungsradius der Ionenbahn, die Länge des Schlitzes der Quelle und die Anordnung der Quellen und Empfänger bestimmt wird; 2. die benötigte Maximalstärke des magnetischen Feldes; 3. ob man eine weite Divergenz des Ionenbündels benutzen solle oder nicht; 4. die Anzahl der Ionenquellen und Empfänger pro Einheit; 5. ob die Ionenquelle auf hohem Potential oder auf Erdpotential liegen solle; 6. die Anzahl der beschleunigenden Elektroden und die maximalen Potentiale an ihnen; 7. der Energiebedarf für die Lichtbogen, die Beschleunigungsspannungen, die Pumpen usw.; 8. der Bedarf an Pumpen; 9. Anzahl der Einheiten pro Polabstand; 10. Anzahl der Einheiten pro Bau.

Experimentelle Einheiten in Berkeley

11.23. Die meisten Züge des Plans für die erste Anlage mußten im Herbst 1942 auf Grund der Resultate mit den Probeläufen im Riesenmagnet zu Berkeley festgelegt werden. Der Entwurf für die Betriebsanlage verlangte jedoch Einheiten von etwas anderem Typ. Während kein Grund zur Annahme bestand, daß diese Änderungen irgendwelche Unterschiede in der Leistungsfähigkeit herbeiführen würden, war es offenbar doch wünschenswert, in Berkeley eine Mustereinheit aufzubauen. Der Bau dieser Einheit wurde ungefähr zu gleicher Zeit genehmigt, als die ersten Werkeinheiten bestellt wurden, so daß Erfahrungen mit jener keinen Einfluß auf den zugrundeliegenden Plan haben konnten. Jedoch wurde sie fertiggestellt und arbeitete gegen April 1943, das ist also sechs Monate vor der ersten Werkeinheit. Infolgedessen war sie unschätzbar für Prüf- und Schulungszwecke. Später wurde ein dritter Magnet in dem großen Magnet-Gebäude in Berkeley gebaut. Alles in allem standen in Berkeley sechs Trenneinheiten zu experimentellen Zwecken oder als Versuchsanlagen gleichzeitig zur Verfügung. Viele Hilfsarbeiten wurden darüber hinaus noch außerhalb der vollständigen Einheiten durchgeführt.

Der Isotron-Separator

11.24. Wie bereits gesagt, begann *H. D. Smyth* von der Princeton-Universität im Spätsommer und Herbst 1941 sich für die elektromagnetische Trennmethode zu interessieren. Sein Interesse richtete sich speziell auf den Entwurf einer Methode, eine ausgedehnte Ionenquelle und ein ausgedehntes Bündel zu benutzen anstatt eines solchen, das durch ein Schlitzsystem wesentlich auf eine Dimension beschränkt ist, wie dies im Calutron Massenseparator der Fall ist. Eine Methode mit einer ausgedehnten Ionenquelle, welche effektiv Trennung leistet, wurde von *R. R. Wilson* in Princeton vorgeschlagen. Die Anordnung, die auf Grund von Wilsons Ideen entstand, erhielt den vorsätzlich bedeutungslosen Namen «Isotron».

11.25. Das Isotron ist ein elektromagnetischer Massenseparator mit einer ausgedehnten Ionenquelle im Gegensatz zu den schlitzförmigen Quellen der gewöhnlichen Massenspektrographen.

Die von der ausgedehnten Quelle ausgehenden Ionen werden zuerst durch ein konstantes intensives elektrisches Feld beschleunigt und erfahren dann eine weitere Beschleunigung durch ein elektrisches Feld von geringer Stärke, das mit Radiofrequenz und in der «Sägezahn»-Manier variiert. Die Wirkung des konstanten elektrischen Feldes besteht darin, einen starken Ionenstrahl mit einheitlicher kinetischer Energie in eine Röhre zu senden und somit unter Geschwindigkeiten, die der Quadratwurzel der Ionenmasse umgekehrt proportional sind. Das variierende elektrische Feld anderseits führt zu schwachen periodischen Variationen der Ionengeschwindigkeit und hat die Wirkung, die Ionen in einem gewissen Abstand innerhalb der Röhre in Bündeln zu vereinigen. (Das gleiche Prinzip wird im Klystron-Hochfrequenz-Oszillator benützt, wo die Elektronen «gebündelt» oder «geschwindigkeitsmoduliert» werden.) Die Ionenbündel verschiedener Masse wandern mit verschiedenen Geschwindigkeiten und trennen sich hierdurch voneinander. An der Stelle (praktisch einer Fläche senkrecht zum Bündel), wo das geschieht, fügt ein Analysator ein fokusierendes elektrisches Querfeld ein mit einer Radiofrequenz-Komponente, die mit der Ankunft der Bündel synchronisiert ist. Die Synchronisierung ist so beschaffen, daß die variierende Komponente der Stärke des Querfeldes null beträgt, wenn das U-235 Ionenbündel durchkommt, und ein Maximum, wenn das U-238 Ionenbündel durchkommt. Die U-235 Bündel werden in einem Kollektor fokussiert, die U-238 dagegen abgelenkt. Auf diese Weise ist die Trennung durchgeführt.

11.26. Dieses Schema wurde am 18. Dezember 1941 auf der Versammlung des Uran-Komitees beschrieben und unmittelbar nachher mit *Lawrence,* der einen Besuch in Princeton machte, ausführlicher besprochen. Die Aussichten der Methode schienen hinreichend, um eine experimentelle Ausführung zu rechtfertigen; man begann damit unter einem OSRD-Kontrakt sogleich und fuhr bis Februar 1943 damit fort. Da die Grundidee neu war, galt es, zwei Hauptentscheidungen zu treffen: 1. ob die Methode überhaupt funktionieren werde; 2. ob sie für eine Großproduktion schnell genug entwickelt werden könne, um mit den mehr orthodoxen, bereits in Entwicklung befindlichen Methoden in Wettbewerb zu treten.

11.27. Ein Versuchsisotron wurde gegen Ende Januar 1942 gebaut und in Betrieb gesetzt. Vorversuche zu jener Zeit zeigten, daß Lithium-Isotope mit dieser Methode getrennt werden könnten. Die erste erfolgreiche Anhäufung von teilweise abgetrennten Uran-Isotopen wurde im Frühjahr 1942 durchgeführt.

11.28. Leider war der Fortschritt im Sommer und Herbst 1942 nicht so schnell, wie man gehofft hatte. Infolgedessen entschloß man sich, die Versuche in Princeton abzuschließen, um das Personal auf den Bauplatz senden zu können, wo das Atombomben-Laboratorium gerade begonnen werden sollte. Bevor die Gruppe Princeton verließ, sammelte ein kleines experimentelles Isotron einige Muster von teilweise getrenntem Uran. Die Methode funktionierte demnach, aber ihre Anwendbarkeit auf einen Großbetrieb war nicht vollständig genug erforscht.

Das Magnetron und die Ionenzentrifuge

11.29. Im Dezember 1941, als das ganze Thema der Isotopentrennung in Berkeley zur Diskussion stand, wurde das Magnetron als möglicher Massen-Trennapparat vorgeschlagen. Unterdessen war *Smyth* von der Princeton-Universität mit *L. P. Smith* von der Cornell-Universität in Kontakt gekommen und hatte dabei festgestellt, daß *Smith* und seine Schüler beträchtliche Arbeit — und zwar mit offensichtlichem Erfolg — über die Trennung der Lithium-Isotope geleistet hatten mit gerade einer solchen Methode. Davon erhielt *Lawrence* auf einer der Zusammenkünfte des Urankomitees im Dezember 1941 in Washington Kenntnis. Sofort setzte sich *Lawrence* mit *Smith* in Verbindung mit dem Resultat, daß *Smith* an dieser Methode vom Februar 1942 bis Juni 1942 in Berkeley arbeitete. *J. Slepian* von dem Westinghouse Forschungslaboratorium in East Pittsburgh kam im Winter 1941/42 auf Einladung von *Lawrence* nach Berkeley; er gewann Interesse an einer Modifikation des Magnetron, die er Ionenzentrifuge nannte. *Slepian* blieb den größten Teil der Zeit bis Herbst 1942 in Berkeley und kehrte nachher nach East Pittsburgh zurück, wo er die Arbeit fortsetzte.

11.30. Uran-Trennung wurde mit dem Magnetron nicht versucht. Experimente mit Lithium mit schwachen Ionenströmen zeigten eine gewisse Trennwirkung, gaben aber keine zuverlässi-

gen Resultate bei starken Ionenströmen. Mit der Ionenzentrifuge konnte man Uranproben von beträchtlichem Trenngrad sammeln, aber auch diese Resultate waren nicht klar oder reproduzierbar.

Die Lage zu Beginn 1943

11.31. Mit dem effektiven Ausscheiden des Isotrons und der Ionenzentrifuge aus dem Entwicklungsprogramm war der Calutrontrenner die einzige elektromagnetische Methode, an der intensiv weitergearbeitet wurde. Man erteilte die Genehmigung, Anfangseinheiten einer Anlage zu bauen, und die Pläne für solche Einheiten wurden festgelegt. Aber das ganze elektromagnetische Programm bestand wenig mehr als ein Jahr, und es war offensichtlich, daß die ausführbaren Pläne mehr auf scharfsinnigen Vermutungen als auf angemessenen Forschungen beruhten. Eine ähnliche Situation hätte bei der Kettenreaktionseinheit entstehen können, wenn man über unbegrenzte Mengen von Uran und Graphit verfügt hätte, bevor die Theorie ausgearbeitet war oder bevor die Kernkonstanten gut bestimmt waren. Glücklicherweise war die Natur der beiden Projekte sehr verschieden; darum war es ein weniger spekulatives Wagnis, in Hast eine elektromagnetische Anlage aufzubauen, als dies bei der Uraneinheit der Fall gewesen wäre. Weitere Forschung und Entwicklung konnte selbst während des Baues und Betriebes der ersten Einheiten der Anlage vorteilhaft fortgesetzt werden.

BAU UND BETRIEB; MÄRZ 1943 BIS JUNI 1945

Vergleich mit Diffusions- und Plutoniumanlagen

11.32. Die vorhergehenden Kapitel zeigen, daß die Zeit Ende 1942 voll von Entscheidungen für das ganze Uran-Projekt war. Denn dies war die Periode, in der die erste sich selbst unterhaltende Kettenreaktion erzeugt wurde, die Baugenehmigungen für die Hanford-Plutoniumanlage, die Diffusionsanlage in Clinton und die elektromagnetische Anlage in Clinton gegeben wurden. Die Diffusionsanlage war anpassungsfähiger als die Plutoniumanlage; denn man konnte die Diffusionsanlage in Sektionen und Stufen aufteilen, konnte sie im ganzen oder in Teilen bauen, so daß sie verschiedene Mengen von U-235 mit verschie-

denen Anreicherungsgraden erzeugte. Die elektromagnetische Anlage war noch anpassungsfähiger, da jede Separationseinheit praktisch von den anderen Einheiten unabhängig war. Der Separationsprozeß bestand in der Beschickung einer Einheit mit Material, dem Betrieb dieser Einheit für eine Zeitdauer, ihrer Stillegung und der Entfernung des Produktes. Um sicher zu gehen, wurden die Einheiten in Gruppen gebaut, aber die meisten Regulierungen waren für jede Einheit getrennt. Diese Eigentümlichkeit machte es möglich, die Anlage schrittweise zu bauen und ihren ersten Teil in Gang zu setzen, noch bevor man mit dem Bau des zweiten begonnen hatte. Auch war es möglich, die Entwürfe einander folgender Einheiten gegenüber den vorhergehenden abzuändern, während der Bau fortschritt; innerhalb gewisser Grenzen war es sogar möglich, veraltete Einheiten in den ersten Gruppen durch neue verbesserte Einheiten zu ersetzen.

Art und Organisation der Entwicklungsarbeit

11.33. Der Bau der ersten Reihe von elektromagnetischen Einheiten in Clinton begann im März 1943, und dieser Teil der Anlage war im September 1943 betriebsfertig. Die Berkeley-Gruppe fuhr fort, die Ionenquellen, die Empfänger und die zusätzlichen Einrichtungen zu verbessern, stets bestrebt, die Ionenströme zu vergrößern. Tatsächlich beschreiben die Berkeley-Berichte nicht weniger als 71 verschiedene Arten von Ionenquellen und 115 verschiedene Typen von Empfängern, die alle das Stadium des Entwurfs erreichten und von denen die meisten konstruiert und geprüft wurden. Sobald der Wert einer vorliegenden Planänderung ausprobiert war, wurde jede Mühe darauf verwandt, sie den Plänen der neuen Einheiten einzuverleiben.

11.34. Derartige Entwicklungsarbeiten erforderten den dauernden Austausch von Informationen zwischen Laboratorium, Ingenieur-Abteilung, Bauabteilungen und Betriebsgruppen. Glücklicherweise war die Zusammenarbeit ausgezeichnet. Die Gesellschaften stationierten Vertreter in Berkeley, und Mitglieder der Berkeley-Forschungsgruppe statteten der Clinton-Anlage häufige und ausgedehnte Besuche ab. In der Tat wurden einige Forschungsmitglieder in die Gehaltsliste (payroll) der Tennessee Eastman Company, die die Anlage in Clinton betrieb, übernom-

men, und eine Gruppe von über hundert Physikern und Forschungsingenieuren, die auf der Gehaltliste von Berkeley blieben, wurden Clinton zugeteilt. Besonders in den Anfangsstadien des Betriebes waren die in Clinton stationierten Berkeley-Leute als «Störungsjäger» («trouble shooters») und als Betriebsinstruktoren von unschätzbarem Wert. Ein Teil der Anlage wurde als Versuchsanlage weitergeführt, um Modifikationen der Ausrüstung und Veränderungen im Betriebsverfahren zu erproben, und wurde zusammen von der Berkeley-Gruppe und der Tennessee Eastman Co. betrieben. Außer der schon erwähnten britischen Gruppe unter *Oliphant* bestand noch eine britische Chemiker-Gruppe in Clinton unter der Leitung von *J. W. Baxter*.

Chemische Probleme

11.35. Anfangs waren die Uransalze, die man als Quellen für die Dämpfe in den Ionen erzeugenden Lichtbogen benutzte, in Berkeley nicht mit sehr erheblicher Gründlichkeit untersucht worden; als aber der Betrieb sich entwickelte, wurden über diese Salze erhebliche Arbeiten gemacht, und es wurde nach einer besseren Uranverbindung als die ursprünglich benutzte gesucht. Ferner wurden einige wertvolle Studien zur Erzeugung der gewählten Verbindung gemacht.

11.36. Das bei weitem wichtigste chemische Problem war die Rückgewinnung der verarbeiteten Uran-Verbindungen aus den Trenneinheiten. Dieses Rückgewinnungsproblem hatte zwei Phasen. Bei Einheiten der ersten Stufe war es wichtig, das abgetrennte Uran mit höchster Wirksamkeit aus den Sammlern zu gewinnen; dagegen war die Rückgewinnung des verstreuten und nicht getrennten Urans aus den andern Teilen der Einheit von geringerer Wichtigkeit. Aber wenn Einheiten von höherer Stufe benutzt werden, enhält sogar das jeweilige Ausgangsmaterial eine hohe Konzentration von U-235, und dann ist es wesentlich, nach jeder Betriebsperiode das ganze Material der Einheit zurückzugewinnen, das heißt dasjenige, was in der Ionenquelle zurückbleibt und was an den Beschleunigungselektroden oder an den Wänden der Magnetkammer oder an den Wänden der Empfänger haftet.

Die thermische Diffusionsanlage

11.37. Fast ein Jahr lang war einzig die elektromagnetische Anlage in Betrieb. Infolgedessen war das Bedürfnis, ihre Produktionsgeschwindigkeit zu erhöhen, ungemein dringend. Man stellte fest, daß jede Methode der Anreicherung — selbst schwache Anreicherung — des der Anlage zuzuführenden Materials die Produktionsgeschwindigkeit erheblich steigern könne. Wenn zum Beispiel eine elektromagnetische Einheit aus natürlichem Uran pro Tag 1 gr Uran mit 40 % U-235 erzeugen kann, so kann sie täglich 2 gr von 80 % U-235 liefern, wenn in dem zugeführten Material die Konzentration an U-235 doppelt so groß ist wie bei dem natürlichen Material (1,4 % statt 0,7 %).

11.38. Wir haben schon von der Arbeit berichtet, die *P. H. Abelson* vom Forschungs-Laboratorium der Marine über die Trennung der Uran-Isotope durch thermische Diffusion in einer flüssigen Uranverbindung durchführte. Bis zum Frühjahr 1943 hatte *Abelson* eine Versuchsanlage aufgebaut, die eine beträchtliche Trennung von erheblichen Mengen einer Uranverbindung leistete. Darum schlug man vor, eine thermische Diffusionsanlage für große Produktion aufzubauen. Eine derartige Anlage ist billiger als jede andere Großproduktionsanlage, und sie kann schneller errichtet werden. Ihre prinzipielle Schwierigkeit besteht in dem enormen Dampfverbrauch, der es undurchführbar erscheinen ließ, den ganzen Trennbetrieb auf diese Weise zu handhaben.

11.39. Nicht nur war eine Versuchsanlage im Forschungs-Laboratorium der Marine bereits in Betrieb, sondern eine zweite etwas größere befand sich auf dem Philadelphia Navy Yard in Bau. Durch die Zusammenarbeit mit der Marine wurden sowohl die Dienste von *Abelson* wie auch die Pläne für eine Großproduktionsanlage dem Manhattan District zugänglich gemacht. Man beschloß, die Großproduktionsanlage für thermische Diffusion in Clinton aufzubauen (unter Benutzung von Dampf aus der Kraftstation, die man für die Gasdiffusionsanlage gebaut hatte) und das Produkt der thermischen Diffusionsanlage als Material für die elektromagnetische Anlage zu benutzen.

11.40. Diese neue thermische Diffusionsanlage wurde während des Spätsommers 1944 in erstaunlich kurzer Zeit errichtet. Trotz einiger Enttäuschungen erfüllte ihr Betrieb erfolgreich die Aufgabe, die Produktionsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Anlage erheblich zu steigern. Sie spornte auch die Arbeit für das Uranrückgewinnungsproblem an. Die Zukunft dieser Anlage ist ungewiß. Der Betrieb der Gasdiffusionsanlage macht es schwierig, genug Dampf zu erzeugen, um die thermische Diffusionsanlage zu betreiben, schafft aber auch einen andern Verbraucher für deren Produkt.

Verschiedene Probleme

11.41. Wenn auch die wissenschaftlichen und technischen Aufgaben, denen die Berkeley-Gruppe gegenüberstand, wahrscheinlich nicht so verschiedenartig und zahlreich waren wie diejenigen, die man in Chicago und an der Columbia-Universität in Angriff nahm, so waren sie gleichwohl zahlreich. So entstanden viele Aufgaben hinsichtlich der Planung der elektrischen Energie-Anlage und der Meßstromkreise, der magnetischen Felder, Isolatoren, Vakuum-Pumpen, Behälter, Kollektoren und Ionenquellen. Viele Dinge der Ausrüstung mußten von Grund auf entworfen und dann unter hohem Vorrang in Massen erzeugt werden.

GEGENWÄRTIGER STAND.

11.42. Die elektromagnetische Trennanlage war in Großbetrieb während des Winters 1944/45 und erzeugte U-235 von genügender Reinheit für den Gebrauch in Atombomben. Ihre Leistungsfähigkeit wird dauernd verbessert und die Forschungsarbeit, wenn auch in einem verkleinerten Maßstab, fortgesetzt.

ZUSAMMENFASSUNG

11.43. In den frühen Tagen des Uran-Projektes wurden die elektromagnetischen Methoden zur Isotopentrennung vorerst zurückgestellt mit Rücksicht auf die zu erwartenden Raumladungseffekte. Im Herbst 1941 griff man die Frage wieder auf; Experimente in Berkeley zeigten, daß man der Raumladungseffekte in weitem Umfang Herr werden könne. Infolgedessen wurde ein

umfassendes Programm zur Entwicklung der elektromagnetischen Methoden in Angriff genommen.

11.44. Unter den verschiedenen vorgeschlagenen Typen der elektromagnetischen Methode begegnete das (in Berkeley entwickelte) Calutron besonderer Aufmerksamkeit. Zwei andere neue Methoden wurden gleichfalls untersucht, eine in Berkeley und eine in Princeton. Der Calutron-Massentrenner besteht aus einer Ionenquelle, aus der ein Strahl von Uran-Ionen durch ein elektrisches Feld herausgezogen wird, aus einem Beschleunigungssystem, in dem die Ionen auf hohe Geschwindigkeit gebracht werden, einem Magnetfeld, in dem die Ionen in Halbkreisbahnen, die von der Ionenmasse abhängig sind, abgelenkt werden, und aus einem Empfängersystem. Die Hauptprobleme, die mit dieser Methode zusammenhängen, sind die Ionenquelle, das Beschleunigungssystem, die Divergenz des Ionenbündels, die Raumladung und die Ausnutzung des magnetischen Feldes. Die Hauptvorteile des Calutrons waren der große Separationsfaktor, geringe Beschickung, kurze Anlaufszeit und Anpassungsfähigkeit des Betriebes. Bis zum Frühjahr 1942 waren hinreichende Fortschritte gemacht, um die Baugenehmigung für eine Anlage zu rechtfertigen, und ein Jahr später waren die ersten Werkeinheiten in den Clinton-Ingenieurwerken in Tennessee zur Erprobung bereit.

11.45. Forschung und Entwicklungsarbeit am Calutron wurden hauptsächlich im Strahlen-Laboratorium der Universität von Californien durchgeführt unter der Direktion von *Lawrence*. Die Firmen Westinghouse, General Electric und Allis Chalmers konstruierten die Mehrzahl der Teile; Stone und Webster bauten die Anlage, und Tennessee Eastman betrieb sie.

11.46. Da die Calutron-Trennmethode aus Schuboperationen in einer großen Anzahl von weitgehend unabhängigen Einheiten bestand, konnte man selbst nach ihrem Betriebsbeginn wesentliche Verbesserungen einführen.

11.47. Im Sommer 1944 wurde eine thermische Diffusionsanlage in den Clinton Engineer Works errichtet, um angereichertes Zufuhrmaterial für die elektromagnetische Anlage zu liefern und dadurch die Produktionsgeschwindigkeit dieser letzteren Anlage zu steigern. Der Plan für die thermische Diffusionsanlage

beruhte auf den Forschungsresultaten, die am Forschungs-Laboratorium der Marine und an der Versuchsanlage, die das Marinedepartement im Philadelphia Navy Yard gebaut hatte, ausgearbeitet worden waren.

11.48. Obwohl die Forschungen über das Calutron später begonnen hatten als die über die Zentrifugal- und Diffusionssysteme, war die Calutron-Anlage die erste, die große Mengen getrennter Uran-Isotopen erzeugte.

XII. KAPITEL. DIE ARBEIT AN DER ATOMBOMBE

DER GEGENSTAND

12.1. Das Gesamtziel der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Bemühungen bestand darin, die Möglichkeit, Atombomben zu schaffen, zu erforschen und konzentrierte spaltbare Produkte, die man für sie brauchte, zu erzeugen. Im vorliegenden Kapitel soll die letzte Stufe der Arbeit dargelegt werden — die Entwicklung der Atombombe selbst in *Los Alamos*. Wie in anderen Teilen des Projekts sind auch hier zwei Phasen zu unterscheiden: die Oganisation und die wissenschaftlich-technische Arbeit selbst. Die Organisation soll kurz beschrieben werden; der Rest des Kapitels wird den wissenschaftlichen und technischen Problemen gewidmet sein. Sicherheitsrücksichten verhindern die Diskussion von vielen der wichtigsten Phasen dieser Arbeit.

GESCHICHTE UND ORGANISATION

12.2. Die Reorganisation des Gesamtprojektes, die Anfang 1942 stattfand, und die darauffolgende allmähliche Verlagerung der Arbeit aus der Oberaufsicht des OSRD in den «Manhattan-Distrikt» sind in Kapitel V beschrieben. Es sei in Erinnerung gebracht, daß die Verantwortlichkeit des «Metallurgischen Laboratoriums» in Chicago ursprünglich die physikalischen Vorstudien zur Atombombe einschloß. Einige solche Studien wurden 1941 durchgeführt; und früh im Jahre 1942 veranlaßte *G. Breit* verschiedene Laboratorien (siehe Kapitel VI, § 6.38), mit den experimentellen Studien jener Probleme zu beginnen, deren Lösung Voraussetzung für einen Fortschritt des Bombenplanes bildeten. Wie in Kapitel VI erwähnt, sammelte *J. R. Oppenheimer* von der Universität in Californien im Sommer 1942 eine Gruppe zu weiteren theoretischen Forschungen und unternahm zugleich eine Koordinierung dieser experimentellen Arbeit. Offiziell unterstand diese Gruppe dem «Metallurgischen Laboratorium», jedoch führte die theoretische Gruppe ihre Arbeit überwiegend an der Univer-

sität von Californien aus. Ende Sommer 1942, als General *L. R. Groves* die Gesamtleitung des Unternehmens übernahm, entschied man sich, die Arbeit wesentlich auszudehnen und so schnell wie möglich ein eigenes Laboratorium einzurichten.

12.3. Bei der Platzwahl für dieses Atombombenlaboratorium waren die allerwichtigsten Überlegungen: Geheimhaltung und Sicherheit. Deshalb entschloß man sich, das Laboratorium an einem einsamen Ort zu errichten und unnötige Verbindungen mit der Außenwelt abzuschneiden.

12.4. Bis November 1942 hatte man sich für einen Platz in Los Alamos, Neu-Mexiko, entschieden. Er lag auf einer «mesa»[1], etwa 30 Meilen von Santa Fe entfernt. Ein Vorzug dieser Lage war es, daß beträchtliche Flächen für Prüffelder zur Verfügung standen. Aber anfänglich bestanden die einzigen Bauten auf dem Platz in einer Handvoll von Gebäuden, die einmal ein kleines Internat gebildet hatten. Es war dort kein Laboratorium, keine Bibliothek, kein Laden, keine angemessene Kraftanlage vorhanden. Der einzige Zugangsweg war eine gewundene Gebirgsstraße. Daß diese Nachteile des Platzes in einem beträchtlichen Grad überwunden wurden, ist das Verdienst der unablässigen Anstrengungen des wissenschaftlichen und militärischen Personals.

12.5. *J. R. Oppenheimer* war von Beginn an Direktor des Laboratoriums. Er kam auf dem Platz im März 1943 an, und bald stießen Gruppen und einzelne Persönlichkeiten von der Princeton-Universität, von den Universitäten von Chicago, California, Wisconsin, Minnesota und von anderen Orten zu ihm. Mit der kräftigen Unterstützung des Generals *L. R. Groves,* von *J. B. Conant* und anderen fuhr *Oppenheimer* fort, Wissenschaftler von anerkannter Fähigkeit um sich zu sammeln, so daß Ende 1944 auf diesem Neu-Mexiko-Plateau eine ungewöhnliche Anhäufung von wissenschaftlichen Stars versammelt war. Schwieriger war die Rekrutierung von jüngerem wissenschaftlichem Personal und von Technikern. Denn bei diesen Leuten wurden

---

[1] Mesa ist eine Bezeichnung für Höhen mit breiter horizontaler Gipfelplatte, «Tafelberge», wie sie im amerikanischen Westen (in Arizona, New-Mexico) vorkommen. Man könnte das Wort mit «erhöhtes Plateau» übersetzen.

die Nachteile der Lage durch die Wertschätzung des großen Zieles nicht immer ausgeglichen. Das Heranziehen des Personals einer Spezial-Ingenieurabteilung verbesserte die Situation beträchtlich.

12.6. Die Aufgabe, die notwendigen Apparate, Maschinen und Ausrüstungen herbeizuschaffen, war natürlich enorm. Drei Lastwagen voll Apparate aus dem Princeton-Projekt befriedigten einige der dringendsten Bedürfnisse. Ein Cyclotron von Harvard, zwei van de Graaff-Generatoren von Wisconsin und eine Cockcroft-Walton-Hochspannungsanlage von Illinois kamen bald an. Zur Illustration der Geschwindigkeit, mit der das Laboratorium errichtet wurde, möchten wir erwähnen, daß das untere Polstück des Cyclotron-Magneten erst am 14. April 1943 gelegt wurde, jedoch fand das erste Experiment bereits Anfang Juli statt. Andere Apparate wurden in Mengen herangeschafft; Hilfslaboratorien wurden gebaut. Heute ist es wahrscheinlich das am besten ausgestattete physikalische Forschungslaboratorium in der ganzen Welt.

12.7. Das Laboratorium wurde finanziert auf Grund eines Kontrakts zwischen dem «Manhattan-District» und der Universität von Californien.

STAND DER KENNTNISSE IM APRIL 1943

Allgemeine Diskussion des Problems

12.8. Im II. Kapitel stellten wir die allgemeinen Bedingungen für die Herbeiführung einer selbstlaufenden Kettenreaktion fest. Es wurde dargelegt, daß vier Prozesse im Wettbewerb um die Neutronen stehen: 1. der Einfang von Neutronen durch Uran, der zu Spaltungen führt; 2. der spaltungslose Einfang durch Uran; 3. der spaltungslose Einfang durch Unreinigkeiten; 4. das Entweichen von Neutronen aus dem System. Folglich ist Voraussetzung für eine solche Kettenreaktion, daß der Prozeß 1. so viel Neutronen erzeugt, als in allen vier Prozessen aufgebraucht werden oder verloren gehen. Ferner hatte man herausgebracht, daß Vorgang 2. durch die Entfernung von U-238 oder durch die Benutzung von Gitter und Bremsstoff verringert werden kann, daß Vorgang 3. bei hohem chemischen Reinheitsgrad seltener wird,

und daß der Verlust durch Vorgang 4. relativ um so mehr abnimmt, je größer die Konstruktionseinheit ist. Bei unseren früheren Diskussionen der Kettenreaktion hatten wir immer vorausgesetzt, daß das Kettenreaktionssystem *nicht* explodieren solle. Jetzt müssen wir überlegen, wie man es macht, *daß* es explodiert.

12.9. Definitionsmäßig ist eine Explosion eine plötzliche und heftige Befreiung eines großen Energiebetrags in einem kleinen Raum. Um in einer Atombombe eine wirksame Explosion herbeizuführen, dürfen die Bestandteile der Bombe nicht nennenswert voneinander getrennt werden, bevor ein beträchtlicher Teil der zur Verfügung stehenden Kernenergie befreit ist, weil die Ausdehnung zu einer vermehrten Entweichung von Neutronen aus dem System führt und so die Kettenreaktion vorzeitig beendet. Anders ausgedrückt, hängt die Wirksamkeit der Atombombe ab: a) vom Geschwindigkeitsgrad, mit dem die von den ersten Spaltungen erzeugten Neutronen in andere Kerne dringen und weitere Spaltungen erzeugen und b) von der Geschwindigkeit, mit der die Bombe auseinanderfliegt. Unter Benutzung der Grundgesetze der Energieerzeugung, des Temperatur- und des Druckanstiegs und der Ausdehnung von Festkörpern und Dämpfen war es möglich, die Größenordnung des Zeitintervalls abzuschätzen, das zwischen dem Beginn und dem Ende der Kernkettenreaktion besteht. Weitaus die meisten technischen Schwierigkeiten des Unternehmens stammen von der außerordentlichen Kürze dieses Zeitintervalls.

12.10. In früheren Kapiteln wurde festgestellt, daß in einem Block von purem Uranmetall keine sich selbsterhaltende Kettenreaktion erzeugt werden könne, gleichgültig wie groß er ist, und zwar wegen des «parasitischen» Einfangs von Neutronen durch U-238. Dieser Schluß ergab sich aus mannigfachen theoretischen Berechnungen und ebenso aus direkten Experimenten. Für den Zweck des Aufbaus einer nichtexplosiven Einheit genügt der Kunstgriff, eine Gitterstruktur und einen Bremsstoff zu benutzen — unter Voraussetzung genügender Reduktion des parasitischen Einfangs. Für den Zweck der Herstellung einer explosiven Einheit ergibt sich aber, daß dieser Prozeß in zweifacher Hinsicht nicht genügt. Erstens brauchen die thermischen Neutronen so lange (so viele Mikrosekunden), bis sie wirken, daß nur eine

schwache Explosion zustande käme. Zweitens ist eine Erzeugungseinheit im allgemeinen zu groß, um transportabel zu sein. Es ist deswegen notwendig, den parasitischen Einfang dadurch zu reduzieren, daß man den größeren Teil von U-238 entfernt — oder dadurch, daß man Plutonium benützt.

12.11. Natürlich waren diese und andere allgemeine Prinzipien sichergestellt, bevor das Los Alamos-Projekt in Gang gesetzt wurde.

Kritische Grösse

12.12. Die Berechnung der kritischen Größe für eine Kettenreaktionseinheit ist ein Problem, das bereits im Zusammenhang mit den Einheiten diskutiert wurde. Obwohl die Berechnung für eine Einheit aus homogenem Metall einfacher ist als für ein Gitter, blieben Ungenauigkeiten im Verlauf der anfänglichen Arbeit bestehen, sowohl wegen des Fehlens genauer Kenntnisse der Konstanten als auch wegen mathematischer Schwierigkeiten. So variieren alle Kernabsorptionsquerschnitte für Streuung, Spaltung und Absorption mit der Neutronengeschwindigkeit. Die Einzelheiten dieser Variation waren experimentell noch nicht bekannt und waren bei den Kalkulationen schwer in Rechnung zu stellen. Bis zum Frühling 1943 verfügte man über verschiedene Schätzungen der kritischen Größe, nach verschiedenen Berechnungsmethoden und unter Benutzung der besten zur Verfügung stehenden Konstanten, doch blieben die Fehlergrenzen immer noch groß.

Der Reflektor oder «Tamper» (Puffer oder Stauer) [1]

12.13. In einer Kettenreaktionseinheit aus Uran und Graphit läßt sich die kritische Größe dadurch beträchtlich verringern, daß man die Einheit mit einer Lage Graphit umgibt, weil eine solche Hülle viele Neutronen in die Einheit zurück «reflektiert». Eine ähnliche Hülle kann man benutzen, um die kritische Größe

[1] Das Wort «tamper» bezeichnet hier einen Gegenstand, wie eine Hülle von hoher Dichte, der durch seine Trägheit das Auseinanderfliegen um einige Mikrosekunden verzögert. Man könnte also Bremskapsel oder Abstoppkapsel oder -hülle sagen, wohl am besten «Puffer» oder «Stauer».

der Bombe zu verkleinern, aber hier kommt der Hülle noch eine zusätzliche Rolle zu: ihre eigene Trägheit verzögert die Ausdehnung des Reaktionsmaterials. Aus diesem Grunde wird die Hülle oft als Stauer («Tamper») bezeichnet. Die Benutzung eines «Tampers» bewirkt eine länger dauernde energiereichere und stärkere Explosion. Der wirksamste «Tamper» ist ein solcher von größter Dichte. Hohe Zugfestigkeit erweist sich als unwichtig. Es ist ein glückliches Zusammentreffen, daß Materialien von hoher Dichte zugleich vorzügliche Neutronen-Reflektoren sind.

Wirksamkeit

12.14. Wie soeben bemerkt, hat die Bombe das Bestreben, in Stücke zu fliegen, sobald die Reaktion fortschreitet, und diese wirkt in der Richtung, die Reaktion selbst zu stoppen. Es ist verhältnismäßig einfach zu berechnen, wie weit die Bombe expandiert sein muß, bevor die Reaktion stoppt. Viel schwerer ist die Berechnung, wie lange diese Explosion braucht, und wieweit sie in dieser Zeit geht.

12.15. Obwohl das Anbringen eines «Tampers» den Zweck hat, die Wirksamkeit der Explosion durch Neutronenreflexion und Verzögerung des Auseinanderfliegens zu erhöhen, ist der Einfluß auf die Leistung nicht so groß wie auf die kritische Masse. Der Grund hierfür liegt in dem Umstand, daß der Reflexionsprozeß verhältnismäßig viel Zeit braucht und keinen großen Umfang annehmen kann, bevor die Kettenreaktion zu Ende ist.

Detonation und Zusammenfügen[1]

12.16. Wie im II. Kapitel festgestellt, ist es unmöglich, eine Kettenreaktion zu verhindern, wenn die Größe der Einheit die kritische Größe überschreitet. Denn es hat immer genug Neutronen (von kosmischen Strahlen, spontanen Spaltungsreaktionen oder von durch Alpha-Partikel in Unreinigkeiten eingeleiteten Reaktionen), um die Kettenreaktion in Gang zu setzen. So

[1] Das Wort assembly ist hier mit Zusammenfügen übersetzt, weil es sich um den plötzlichen Vorgang der schußartigen Vereinigung der wirksamen beiden Bombenteile handelt, die zur kritischen Größe und zur Kettenreaktion führt.

muß die Bombe bis zu dem Augenblick, da man die Detonation herbeiführen will, aus einer Anzahl getrennter Teile bestehen, von denen jeder unterhalb der kritischen Größe bleibt, sei es, weil er klein ist oder weil er eine ungünstige Form hat. Um dann die Detonation herbeizuführen, müssen die Teile der Bombe rapid zusammengebracht werden. Denn im Laufe dieses Zusammenfügungsprozesses könnte die Kettenreaktion vor sich gehen — zufolge des Vorhandenseins «verirrter» (stray) Neutronen —, *bevor* die Bombe ihre kompakteste Form (damit ihre höchste Reaktionsfähigkeit) erreicht hat. Dann aber hat die Explosion die Tendenz, das Erreichen dieser kompaktesten Form zu verhindern. Das könnte dazu führen, daß die Explosion so wirkungsschwach wäre, daß sie relativ nutzlos würde. Das Problem ist infolgedessen ein doppeltes: 1. die Vereinigungszeit auf ein Minimum zu reduzieren, und 2. die Anzahl der «verirrten» Neutronen (Vorexplosions-Neutronen) auf das äußerste zu reduzieren.

12.17. Manche Überlegungen mußten über die Gefahr angestellt werden, einen Blindgänger zu erzeugen, also eine Detonation von solcher Unwirksamkeit, daß selbst die Bombe nicht vollständig zerstört wird. Das würde natürlich den Feind mit einem Vorrat höchst wichtigen Materials versehen.

Leistungsfähigkeit (Effectiveness)

12.18. In Kapitel II und IV wurde dargelegt, daß das Ausmaß befreiter Energie nicht das einzige Kriterium für den Wert einer Bombe bildet. Man war durchaus nicht sicher, daß eine Uranbombe, deren Energiefreigabe der von 20 000 Tonnen TNT gleichkommt, hinsichtlich der militärischen Zerstörung ebenso leistungsfähig sein würde wie, sagen wir, 10 000 Zweitonnenbomben. Tatsächlich gab es gute Gründe für die Vermutung, daß der Zerstörungseffekt pro freigegebener Kalorie abnimmt, wenn der Gesamtbetrag der freigegebenen Energie zunimmt. Anderseits steigt in den Atombomben der gesamte pro Kilogramm spaltbares Material freigegebene Energiebetrag (das bedeutet die Leistung[1] der freigegebenen Energie) mit der Größe der Bombe.

[1] Hier ist also mit «efficiency» (Leistung) die Energiefreigabe pro kg definiert.

Deshalb war die günstigste Größe der Atombombe nicht leicht bestimmbar. Ein taktischer Gesichtspunkt, der den Gegenstand weiterhin kompliziert, besteht in dem Vorteil der gleichzeitigen Zerstörung eines großen Gebietes von feindlichem Gelände. Um eine vollständige Schätzung der Leistungsfähigkeit einer Atombombe zu bekommen, muß man auch die moralische Wirkung in Betracht ziehen. (Fußnote im Original: Der Rest dieses Paragraphen ist einer Veröffentlichung des Kriegsdepartements entnommen, die auf die erste Anwendung der Atombombe gegen Japan folgte.) Die Bombe wird im Kampf in einer solchen Höhe über dem Boden zur Detonation gebracht, daß sie die maximale Explosionswirkung gegen Bauten ergibt und die radioaktiven Produkte als Wolke aussät. Durch die Höhe der Explosion werden praktisch alle radioaktiven Produkte durch die aufsteigende heiße Luftsäule in hohe Luftregionen geführt und unschädlich über einem weiten Gebiet zerstreut. Selbst bei dem Neu-Mexiko-Versuch, wo die Höhe des Explosionsortes notwendigerweise gering war, wurde nur ein kleiner Bruchteil der Radioaktivität unmittelbar unterhalb der Bombe niedergeschlagen.

Methode des Zusammenfügens

12.19. Seitdem Schätzungen gemacht worden waren über die Geschwindigkeit, mit der die unterkritischen Massen von U-235 schnell genug zusammengeführt werden müßten, um eine Vorentladung zu verhüten, wurde viel darüber nachgedacht, wie man dies praktisch verwirklichen könne. Die nächstliegende Methode für eine sehr rasche Vereinigung (der wirksamen Massen) der Atombombe bestand darin, einen Teil als Geschoß in einer Kanone in den zweiten Teil als Ziel hineinzuschießen. Die Masse des Geschosses, seine Geschwindigkeit und das nötige Kaliber der Kanone sind in der Größenordnung nicht weit entfernt von den gebräuchlichen Ausmaßen. Aber neue Probleme entstanden durch den wichtigen Umstand, daß ein sehr plötzlicher und vollkommener Kontakt zwischen Projektil und Ziel herbeigeführt werden muß, ferner durch den Gebrauch von «Tampers» («Stauern») und durch die Notwendigkeit transportabler Konstruktion. Keines dieser technischen Probleme ist in irgendeinem

nennenswerten Umfang vor der Errichtung des Los Alamos-Laboratoriums studiert worden.

12.20. Man war sich auch darüber im klaren, daß man wohl auch Pläne ausarbeiten könnte, um Neutronen absorbierende Stoffe in die Bombe hineinzubringen, und zwar so, daß die Neutronen in den Anfangsstadien der Kernreaktionen weniger wirksam wären. Auf diese Weise könnte man die Tendenz der Bombe, zu früh und unwirksam zu explodieren, auf ein Minimum herabsetzen. Solche Vorrichtungen zur Erhöhung der Wirksamkeit der Bombe werden autokatalytisch genannt.

Zusammenfassung des Standes der Kenntnisse bis April 1943

12.21. Im April 1943 war die verfügbare Kenntnis von dem, was in Verbindung mit dem Plan der Atombombe von Interesse war, vorläufig und ungenau. Man bedurfte dringend weiterer und ausgedehnter theoretischer Untersuchungen über kritische Größe, Leistung, Puffereffekt («Tamper»-Effekt), Methode der Auslösung und Leistungsfähigkeit. Man mußte die Messungen der Kernkonstanten von U-235, von Plutonium und des «Tamper»-Materials ausdehnen und verbessern. Im Falle von U-235 und Plutonium hatte man mit nur winzigen Mengen Probemessungen zu machen, bis größere Quantitäten zur Verfügung standen.

12.22. Außer diesen Problemen auf dem Gebiet der theoretischen und experimentellen Physik gab es noch eine Menge von chemischen, metallurgischen und technischen Fragen, die man kaum berührt hatte; so z. B. die Reinigung und Herstellung von U-235 und Pu und die Herstellung des «Tampers». Endlich gab es Aufgaben hinsichtlich des raschen Zusammenfügens der Bombe, die von kaum vorstellbarer Kompliziertheit waren.

DIE ARBEIT DES LABORATORIUMS

Einführung

12.23. Der wissenschaftliche Stab in Los Alamos wurde verwaltungsmäßig in sieben Abteilungen geteilt, eine Anordnung, die verschiedentliche Veränderungen erfuhr. Im Frühling 1945 waren diese Abteilungen die folgenden: Abteilung für theoreti-

sche Physik unter *H. Bethe,* Abteilung für experimentelle Kernphysik unter *R. R. Wilson,* Abteilung für Chemie und Metallurgie unter *J. W. Kennedy* und *C. S. Smith,* Abteilung für Armeematerial unter Capt. *W. S. Parsons* (USN), Sprengstoffabteilung unter *G. B. Kistiakowsky,* Abteilung für die Physik der Bombe unter *R. F. Bacher* und Abteilung für fortgeschrittene Entwicklungsarbeit unter *E. Fermi.* Alle Abteilungen unterstanden *J. R. Oppenheimer,* dem Direktor des Los Alamos-Laboratoriums, der bei der Koordinierung der Forschung seit Dezember 1944 von *S. K. Allison* unterstützt wurde. *J. Chadwick* aus England und *N. Bohr* aus Dänemark brachten viel Zeit in Los Alamos zu und gaben unschätzbare Ratschläge. *Chadwick* war der Führer einer britischen Delegation, die wesentlich zum Erfolg des Laboratoriums beitrug. Aus Gründen der Sicherheit kann der größte Teil der Laboratoriumsarbeiten nur ausschnittweise wiedergegeben werden.

Abteilung für theoretische Physik

12.24. Zwei Überlegungen gaben der Arbeit der Abteilung für theoretische Physik unter *H. Bethe* ungewöhnliche Wichtigkeit. Die erste davon war die Notwendigkeit, alles, von den Ausgangsmaterialien bis zu deren Verwendungsmethoden, gleichzeitig zu entwickeln — dies, obgleich die Hauptstoffe (U-235 und Plutonium) praktisch nicht erhältlich und alle Verfahren völlig neu waren. Die zweite Überlegung betraf die Unmöglichkeit, eine Atomexplosion (für experimentelle Zwecke) in kleinem Umfang herbeizuführen, indem man nur eine kleine Menge von spaltbarem Metall benutzte. (Es entsteht eben überhaupt keine Explosion, wenn nicht die Masse des spaltbaren Materials die kritische Masse übersteigt.) So wurde es notwendig, von Experimentaldaten auszugehen, die mit winzigen Mengen von Stoff gewonnen waren, und diese mit den zur Verfügung stehenden Theorien so genau wie möglich zu verbinden, um über die Vorgänge in der Bombe zu Voraussagen zu kommen. Nur auf diese Weise war es möglich, vernünftige Pläne für andere Teile des Projekts zu machen und Entscheidungen über Plan und Konstruktion zu treffen, ohne auf umständliche Experimente mit großen Stoffmengen zu warten. Um einige Beispiele zu nennen: Theoretische Untersuchungen

waren notwendig, um zu rohen Schätzungen über die Dimensionen der Kanone zu kommen, um die Metallurgen bei der Wahl des «Tamper»-Materials[1] anzuleiten und um den Einfluß der Reinheit des Spaltmaterials auf die Leistung der Bombe zu bestimmen.

12.25. Die Bestimmung der kritischen Größe der Bombe war eines der Hauptprobleme der Abteilung für theoretische Physik. Im Laufe der Zeit wurden in bezug auf die theoretische Annäherung verschiedene Fortschritte gemacht, wodurch es möglich wurde, praktisch all den damit verknüpften vielfältigen Phänomenen Rechnung zu tragen. Anfangs hatte man angenommen, daß die Neutronendiffusion ähnlich verlaufe wie die Diffusion durch Wärme. Aber diese naive Analogie mußte aufgegeben werden. Bei den ersten theoretischen Arbeiten ging man von der Annahme aus, daß die Neutronen alle dieselbe Geschwindigkeit und eine isotrope Streuung zeigten. So entwickelte man eine Methode zur Berechnung der kritischen Größe für verschiedene Formen des Spaltmaterials unter der Voraussetzung, daß die mittlere freie Weglänge der Neutronen im «Tamper»-Material dieselbe sei wie im Spaltmaterial. Diese Methode wurde später verbessert, zuerst durch Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit der Streuung und ferner durch Berücksichtigung von Unterschieden der freien Weglänge im Kern und Puffermaterial. Noch später fand man Mittel, um die Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen zu berücksichtigen, ferner die Änderung der Wirkungsquerschnitte mit der Geschwindigkeit und die unelastische Streuung in Kern und Puffermaterial. So wurde es möglich, kritische Größen bei fast jeder Art von Puffermaterial abzuschätzen.

12.26. Die Geschwindigkeit der Abnahme der Neutronendichte in Bombenmodellen, die kleiner sind als die kritische Größe, kann man berechnen und dabei alle oben erwähnten Variabeln berücksichtigen. Die Geschwindigkeit der Annäherung an die kritische Bedingung, wenn der Geschoßteil der Bombe sich gegen den Zielteil bewegt, wurde theoretisch studiert. Ferner wurde die beste Verteilung des Spaltmaterials in Geschoß und Ziel theoretisch festgestellt.

12.27. Man entwickelte Techniken, um sich mit Anordnungen zu befassen, in denen die Neutronenzahl so klein ist, daß eine

---

[1] Vergl. 12.13.

sorgfältige statistische Analyse der Wirkungen gemacht werden muß. Das wichtigste Problem in diesem Zusammenhang war die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit dafür, daß in einer Bombe von mehr als kritischer Größe durch ein «verirrtes» Neutron eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion gestartet wird. Ein verwandtes Problem war die Bestimmung der Schwankungsweite der Neutronendichte innerhalb einer Bombe, deren Größe der kritischen Größe nahekommt. Im Sommer 1945 wurden viele derartige Berechnungen durch Experimente kontrolliert.

12.28. Umfangreiche theoretische Arbeit wurde auf den Ausgleich des Zustandes der Stoffe bei hohen Temperaturen und Drucken verwandt, die man bei der Explosion der Atombomben erwarten mußte. Man berechnete die Ausdehnung der verschiedenen Konstruktionsteile der Bombe während und nach dem Augenblick der Kettenreaktion. Beträchtliche Detailuntersuchungen wurden den Wirkungen der Strahlung gewidmet.

12.29. Hat man die bei der Explosion einer Bombe entfesselte Energie berechnet, so möchte man natürlich den hierbei erzeugten militärischen Schaden abschätzen. Diese Aufgabe schließt Analysen der Stoßwellen in Luft und Erde ein, ebenso die Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Explosion unterhalb der Oberfläche des Meeres und anderes.

12.30. Zusätzlich zu den oben erwähnten Aufgaben wurden beträchtliche Anstrengungen zur Auswertung der Vorversuche gemacht. So prüfte man die Rückstreuung der Neutronen durch die verschiedenen vorgeschlagenen Puffermaterialien. Auch analysierte man die Resultate der Experimente über die Neutronenvermehrung bei unterkritischen Mengen Spaltmaterials.

Abteilung für experimentelle Kernphysik

12.31. Zwei Arten von Experimenten wurden von der Gruppe für experimentelle Kernphysik in Los Alamos durchgeführt: «Differential»-Experimente, z. B. um den Spaltungswirkungsquerschnitt eines speziellen Isotops für Neutronen bestimmter Geschwindigkeit festzustellen, und «Integral»-Experimente, wie etwa die Bestimmung der durchschnittlichen Streuung von Spaltneutronen durch einen benutzten Puffer.

12.32. Viele Kernkonstanten waren im Metallurgischen Laboratorium der Universität von Chicago und an andern Orten bestimmt worden, aber es gab noch eine Anzahl wichtiger Konstanten, die man nicht gemessen hatte — speziell solche, die mit schnellen Neutronen zusammenhängen. Einige der wichtigsten Fragen waren die folgenden:

1. Welches sind die Spaltungswirkungsquerschnitte für U-234, U-235, U-238, Pu-239 usw.? Wie ändern sie sich mit der Neutronengeschwindigkeit?

2. Welches sind die Wirkungsquerschnitte der gleichen Kerne für elastische Streuung (auch für Kerne der Puffermaterialien)? Wie ändern sie sich mit der Neutronengeschwindigkeit?

3. Welches sind für die obengenannten Kerne die unelastischen Wirkungsquerschnitte?

4. Welches sind die Absorptionsquerschnitte für andere als die Spaltprozesse?

5. Wieviel Neutronen werden bei der Spaltung jedes der oben erwähnten Kerne ausgesandt?

6. Was ist die volle Erklärung für die Tatsache, daß der Betrag der pro Spaltung ausgesandten Neutronen nicht ganzzahlig ist?

7. Wie groß ist die Anfangsenergie der bei Spaltung erzeugten Neutronen?

8. Ändert sich Zahl oder Energie dieser Neutronen mit der Geschwindigkeit der einfallenden Neutronen?

9. Werden die Spaltneutronen unmittelbar ausgesandt?

10. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit der spontanen Spaltung bei den verschiedenen spaltbaren Kernen?

12.33. Zusätzlich zu den Versuchen, Antwort auf diese Fragen zu bekommen, erforschte die Los Alamos-Gruppe für experimentelle Kernphysik viele Probleme von großem wissenschaftlichem Interesse, von denen man erwartete, daß sie für den endgültigen Entwurf eine Rolle spielen könnten. Ob dies nun der Fall war oder nicht, das so von der Abteilung angesammelte wissenschaftliche Material bildet einen wesentlichen und unschätzbaren Teil alles Nachdenkens über die Kernprobleme.

12.34. *Experimentelle Methoden.* Die früheren Kapitel enthalten wenig oder gar keine Diskussion der experimentellen Tech-

nik, ausgenommen derjenigen für die Beobachtung von schnellen (geladenen) Partikeln (siehe Anhang I). Um Antwort auf die oben gestellten 10 Fragen zu erhalten, sollten wir zu folgendem in der Lage sein:

1. die Anzahl der Neutronen einer gegebenen Energie zu bestimmen;
2. Neutronen jeder gewünschten Energie zu erzeugen;
3. die Ablenkungswinkel gestreuter Neutronen zu bestimmen;
4. die Anzahl der stattfindenden Spaltungen zu bestimmen;
5. andere Formen der Neutronenabsorption zu entdecken, zum Beispiel künstliche Radioaktivität.

Wir werden kurz angeben, wie solche Beobachtungen gemacht werden.

12.35. *Das Auffinden von Neutronen.* Drei Wege stehen zur Verfügung, um Neutronen festzustellen: durch Ionisation, die von leichten Atomkernen herrührt, welche durch elastische Zusammenstöße mit Neutronen hohe Geschwindigkeiten bekamen; durch radioaktiven Zerfall unstabiler Kerne, der durch Neutronenabsorption zustande kommt; und schließlich durch Spaltungen infolge von Neutronenabsorption. Alle drei Prozesse führen zur Ionenerzeugung, und die resultierende Ionisation kann mit Hilfe von Elektroskopen, Ionisationskammern, Geiger-Müller-Zählern, Wilson-Nebelkammern, Spuren in photographischer Emulsion etc. festgestellt werden.

12.36. Während die bloße Feststellung von Neutronen nicht schwer ist, ist die Messung der Neutronengeschwindigkeiten entschieden schwieriger. Die Wilson-Nebelkammermethode und die photographische Emulsionsmethode ergeben die unmittelbarsten Resultate, sind aber umständlich zu handhaben. Man benutzte öfter verschiedene Kombinationen von Stoffen mit selektiver Absorption — zum Beispiel: wenn eine Folie, von der man weiß, daß sie Neutronen von nur einem bestimmten Energiebereich absorbiert, in den Weg der Neutronen gebracht und dann entfernt wird, dann ist ihr Grad von Radioaktivität voraussichtlich proportional zu der Zahl der Neutronen von eben diesem speziellen Energiebereich. Eine andere Untersuchungsweise besteht in dem Studium derjenigen induzierten Radioaktivität, von der man

weiß, daß sie nur von Neutronen erzeugt wird, deren Energie oberhalb einer bestimmten Schwelle liegt.

12.37. Eine elegante Art, Neutronenwirkungen von einer einzelnen willkürlich gewählten Geschwindigkeit zu studieren, ist die «Flugzeit»-Methode («time of flight» method). Bei dieser Methode wird eine Neutronenquelle moduliert; d. h. man läßt die Quelle Neutronen in kurzen «Ausbrüchen» oder «Impulsen» aussenden. Bei jedem Stoß gibt es eine große Menge Neutronen in einem weiten Geschwindigkeitsintervall. Das Ziel-Material[1] und der Detektor werden in beträchtlicher Entfernung von der Quelle angebracht (mehrere Fuß oder Yards weit weg: Fuß = 30,5 cm; Yard = 91,4 cm). Auch der Detektor wird «moduliert», und zwar mit der gleichen Periodenzahl. Der Phasenrhythmus wird so gewählt, daß der Detektor lediglich während eines kurzen Intervalls reagieren kann, das eine bestimmte Zeit, nachdem der Neutronenstoß die Quelle verlassen hat, beginnt. Auf diese Weise ist jede Wirkung, die der Detektor aufzeichnet (zum Beispiel Spaltungen in einer Uranschicht, die an der inneren Oberfläche einer Ionisationskammer angebracht ist), das Resultat nur derjenigen Neutronen, die gerade in dem Moment ankommen, wo der Detektor reagieren kann, und die somit in einem ganz bestimmten Zeitintervall von der Quelle zum Detektor gewandert sind. Mit andern Worten: die gemessenen Effekte stammen lediglich von denjenigen Neutronen, die die passende Geschwindigkeit haben.

12.38. *Erzeugung von Neutronen.* Alle Neutronen stammen aus Kernreaktionen, und ihre Anfangsgeschwindigkeit hängt vom Energiegleichgewicht der einzelnen Reaktionen ab. Ist die Reaktion endotherm, das heißt, ist die gesamte Masse der entstehenden Partikel größer als die der Anfangspartikel, dann kommt die Reaktion nicht zustande, außer wenn das auftreffende Partikel mehr als den Schwellenwert an kinetischer Energie besitzt. Bei höheren Energien der auftreffenden Partikel steigt die kinetische Energie der erzeugten Teilchen, speziell der Neutronen, mit der Steigerung der kinetischen Energie des einschlagenden Teilchens oberhalb des Schwellenwertes. So absorbiert die $Li^7(p,n)Be^7$-Reaktion 1,6 Mev Energie, weil die erzeugten Partikel schwerer sind als die Anfangspartikel. Alle weitere Energie der einfallen-

[1] Der Stoff, auf den die Neutronen auffallen (target).

den Protonen erhöht die kinetische Energie der Produkte, so daß die maximale Geschwindigkeit der erzeugten Neutronen mit der Geschwindigkeit der einfallenden Protonen steigt. Um jedoch Neutronen von einem engeren Geschwindigkeitsbereich zu bekommen, muß man eine dünne Scheibe (target) benutzen, die Neutronen müssen alle im gleichen Winkel ausgesandt werden, und die Protonen müssen alle die Scheibe mit der gleichen Geschwindigkeit treffen.

12.39. Obwohl die gleichen Gesetze der Energie- und Impulserhaltung auch für exothermische Kernreaktionen Anwendung finden, ist die hierbei befreite Energie gewöhnlich groß im Vergleich zu der kinetischen Energie der Bombardierungsteilchen, und sie bestimmt wesentlich die Neutronengeschwindigkeit. Oft gibt ein und dieselbe Reaktion mehrere Geschwindigkeitsbereiche, Es gibt einige Reaktionen zur Erzeugung von Neutronen von sehr hoher Energie (nahezu 15 Mev).

12.40. Da nur eine begrenzte Anzahl von Kernreaktionen als Neutronenquelle dient, kann man Neutronen nur mit Anfangsgeschwindigkeiten erzeugen, die innerhalb bestimmter Bereiche liegen. Es ist zwar nicht schwer, die Neutronen abzubremsen, aber es ist unmöglich, sie gleichmäßig abzubremsen, das heißt also, ohne die Geschwindigkeitsverteilung auszuweiten. Das wirksamste Bremsverfahren besteht in der Benutzung von Bremsstoff wie in der Graphiteinheit; tatsächlich ist die Erzeugungseinheit selbst eine ausgezeichnete Quelle von thermischen (das heißt sehr langsamen) oder nahezu thermischen Neutronen.

12.41. *Messung der Ablenkungswinkel.* Die Schwierigkeiten die Abweichungswinkel von Neutronen zu messen sind vor allem solche der Intensität und der Deutung. Die Anzahl der in eine bestimmte Richtung «gestreuten» Neutronen mag relativ klein sein, und die «gestreuten» Neutronen enthalten fast immer vagierende Neutronen, die nicht von dem betreffenden «target» stammen.

12.42. *Bestimmung der Anzahl der Spaltungen.* Es ist verhältnismäßig einfach, die Anzahl der Spaltungen durch Neutronen oder der spontanen Spaltungen festzustellen. Man kann dazu Ionisationskammern, Zählrohre und viele andere Arten von Detektoren benutzen.

12.43. *Auffindung der beim Neutroneneinfang entstehenden Produkte.* Es ist häufig erwünscht, im einzelnen festzustellen, was mit den Neutronen geschieht, die spaltungslos absorbiert werden, zum Beispiel bei Resonanz oder «Strahlungs»-Einfang durch U-238 mit Verwandlung in U-239, welcher Vorgang zur Erzeugung von Plutonium führt. In der Regel bedingen solche Studien eine Kombination von mikrochemischen Trennanalysen und radioaktiven Analysen.

12.44. *Einige Versuche über Kernkonstanten.* Um die Zeit der Einrichtung des Los Alamos-Laboratoriums waren umfangreiche Arbeiten über die Wirkungen langsamer Neutronen auf die damals erhältlichen Materialien schon durchgeführt. So war zum Beispiel der Wirkungsquerschnitt für Spaltung durch thermische Neutronen für natürliches Uran bestimmt worden und ebenso für die getrennten Uran-Isotope und für Plutonium. Einige Angaben über die Wirkungsquerschnitte schneller Neutronen waren veröffentlicht, und zusätzliche Informationen waren in den Laboratorien des Unternehmens erhältlich. Um diese Angaben zu erweitern und zu verbessern, vervollkommnete Los Alamos den Gebrauch des Van de Graaff-Generators für die Li^7 (p, n) Be^7-Reaktion, um damit Neutronen von jeder erwünschten Geschwindigkeit innerhalb des Bereichs von 3000 bis 2 000 000 Elektronvolt zu erzeugen. Auch erzielte man Erfolge in der Modulierung des aus dem Cyclotron austretenden Strahlenbündels und in der Entwicklung der Flugzeit-Methode der Neutronen, um so die Wirkungen von vielen Geschwindigkeitsbereichen auf einmal hervorzubringen. Spezialverfahren wurden zum Ausfüllen der Lükken in den Neutronen-Energiebereichen ausgearbeitet. Besonders wichtig war die Ermöglichung feinerer Messungen, als man größere Mengen von U-235, U-238 und Plutonium zu erhalten begann. Im ganzen genommen ist jetzt der Wert des Spaltungs-Wirkungsquerschnittes als Funktion der Neutronenenergie im Intervall von ungefähr 0 bis 3 000 000 Elektronvolt für diese Materialien recht gut bekannt.

12.45. *Einige Gesamtversuche (Integral Experiments).* Zwei Gesamtversuche (Versuche mit vollständigen Systemen, also mit Spaltmaterial, Reflektor und vielleicht auch Bremsstoff) mögen beschrieben werden. Im ersten dieser Integral-Experimente wurde

ein Kettenreaktionssystem aufgebaut, das eine relativ große Menge von U-235 in flüssiger Lösung enthielt. Es sollte auf einem sehr niedrigen Energieniveau arbeiten und besaß kein Kühlsystem. Sein Zweck war, die Bestätigung der vorausgesagten Wirkungen von Reaktionssystemen mit angereichertem U-235 sicherzustellen. Die Resultate waren tatsächlich sehr nahe den Erwartungen.

12.46. Das zweite Integralexperiment wurde mit einer Einheit durchgeführt, die eine Mischung von Uran und einem wasserstoffhaltigen Bremsstoff enthielt. In ihrer ersten Form war diese Einheit somit eine Kettenreaktionseinheit mit langsamen Elektronen. Sodann wurde diese Einheit umgebaut für den Gebrauch mit weniger Wasserstoff. Bei dieser Anordnung der Einheit wurde die Spaltung durch schnelle Neutronen wichtig. Der Umbau wurde noch mehrfach wiederholt, jedesmal mit weniger Wasserstoff. Durch diese Serie von Umbauten änderte man den Charakter der Reaktion fortgesetzt so, daß die Spaltung durch thermische Neutronen immer weniger und weniger wichtig wurde, während die Bedeutung der Spaltung durch schnelle Neutronen mehr und mehr zunahm — um so den Arbeitsbedingungen der Bombe näher zu kommen.

12.47. *Zusammenfassung der kernphysikalischen Resultate.* Die Kernkonstanten von U-235, U-238 und Plutonium wurden mit einem beträchtlichen Genauigkeitsgrad über ein Neutronen-Energieintervall von thermischen Geschwindigkeiten bis zu 3 000 000 Elektronvolt durchgemessen. Mit andern Worten: die Fragen 1, 2, 3, 4 und 5 von den 10 Fragen, die eingangs dieses Abschnittes (vergl. 12.32) gestellt wurden, fanden ihre Beantwortung. Das Spaltungsspektrum für U-235 und Pu-239 (Frage 7) ist recht gut bekannt. Die Spontanspaltung (Frage 10) wurde für verschiedene Kerntypen untersucht. Vorläufige Resultate der Fragen 6, 8 und 9 über Einzelheiten des Spaltprozesses wurden erzielt.

Abteilung für Chemie und Metallurgie

12.48. Die Abteilung für Chemie und Metallurgie des Los Alamos-Laboratoriums stand unter der gemeinschaftlichen Leitung von *J. W. Kennedy* und *C. S. Smith.* Sie war verantwortlich

für die Schlußreinigung des angereicherten Spaltmaterials, für die Herstellung des Bombenkerns, des Stauers («tamper») usw. und für verschiedene andere Gegenstände. Bei aller Arbeit dieser Abteilung, die das angereicherte Spaltmaterial betraf, mußte man besondere Sorgfalt anwenden, um keinerlei nennenswerte Mengen der Stoffe zu verlieren, die weit wertvoller waren als Gold. So waren die bereits in Chicago und anderwärts gut ausgearbeiteten Verfahren für die Reinigung und Fabrikation natürlichen Urans oft *nicht* befriedigend, um sie auf hochangereicherte Proben von U-235 anzuwenden.

Abteilungen: Armeematerial, Explosivstoffe und Bombenphysik

12.49. Der vorangehende Bericht über die Tätigkeit der Abteilung für theoretische Physik, experimentelle Kernphysik und Chemie und Metallurgie ist recht unvollständig, weil wichtige Gesichtspunkte aus Sicherheitsgründen nicht erörtert werden dürfen. Aus den gleichen Gründen kann hier keine Diskussion der Arbeiten stattfinden, die von den Abteilungen Armeematerial, Explosivstoffe und Bombenphysik durchgeführt wurden.

ZUSAMMENFASSUNG

12.50. Im Frühling 1943 wurde ein vollständig neues Laboratorium in Los Alamos (Neu-Mexiko) unter *J. R. Oppenheimer* errichtet mit dem Zweck, den Entwurf und die Konstruktion der Atombombe vom Stadium, da man U-235 oder Plutonium erhielt angefangen bis zum Stadium der Verwendung der Bombe zu durchforschen. Das neue Laboratorium verbesserte die theoretische Behandlung der Entwurfs- und der Durchführungsprobleme, verfeinerte und erweiterte die damit verknüpften Messungen der Kernkonstanten, entwickelte Methoden zur Reinigung des zu benutzenden Materials und entwarf und konstruierte schließlich verwendbare Atombomben.

XIII. KAPITEL. ALLGEMEINE ZUSAMMENFASSUNG

GEGENWÄRTIGE GESAMTLAGE

13.1. Als Resultat der Arbeiten der «Manhattan District»-Organisation in Washington und in Tennessee, der wissenschaftlichen Gruppen in Berkeley, Chicago, an der Columbia-Universität, in Los Alamos und anderswo, der Industriegruppen in Clinton, Hanford und vielen andern Plätzen erwarten wir jetzt Ende Juni 1945 Tag für Tag die Nachricht, daß die erste von Menschen erdachte Atombombe explodiert sei. Wir glauben, daß alle Probleme endlich soweit gelöst sind, um die Bombe zu verwirklichen. Eine selbstlaufende Neutronen-Kettenreaktion durch Kernspaltung ist nachgewiesen. Die notwendigen Bedingungen, daß eine solche Reaktion explosiv verläuft, sind festgestellt und können verwirklicht werden. Erzeugungsanlagen mehrerer verschiedener Typen sind in Betrieb und liefern Vorräte des explosiven Materials. Obwohl wir nicht wissen, wann die erste Explosion stattfinden wird, noch wie wirksam sie sein wird, so wird doch die Nachricht von ihrer Verwirklichung der Veröffentlichung dieses Berichtes vorangehen. Selbst wenn der erste Versuch verhältnismäßig unwirksam wäre, besteht wenig Zweifel, daß spätere Versuche hochgradig wirksam sein werden; von der Zerstörung einer einzigen Bombe erwartet man, daß sie einem ganz großen Luftangriff nach den üblichen Methoden vergleichbar sei.

13.2. Eine Waffe ist entwickelt, die an möglicher Zerstörungskraft den wildesten nächtlichen Angsttraum der Einbildungskraft übersteigt; eine Waffe, so ideal geeignet zu plötzlichen Attacken ohne Warnung, daß die Großstädte eines Landes über Nacht zerstört werden können durch eine scheinbar befreundete Macht. Diese Waffe wurde nicht durch die teuflische Eingebung eines verworfenen Genius geschaffen, sondern durch die zähe Anstrengung von Tausenden von normalen Männern und Frauen, die im Dienst der Sicherheit ihres Landes arbeiteten. Viele der

benutzten Prinzipien waren seit 1940 der internationalen Welt der Wissenschaft gut bekannt. Auf Grund dieser Prinzipien, die nötigen industriellen Prozesse zu entwickeln, war kostspielig in bezug auf Zeit, Anstrengung und Geld; aber die Verfahren, die wir für den ernsthaften Versuch ausgesucht hatten, waren erfolgreich, und andere, die wir nicht ausgewählt haben, könnten wahrscheinlich erfolgreich ausgebaut werden. Wir haben einen Anfangsvorteil des zeitlichen Vorsprungs, weil — soweit wir wissen — andere Länder nicht in der Lage gewesen waren, analoge Entwicklungen während der Kriegszeit zur Durchführung zu bringen. Wir besaßen außerdem einen allgemeinen Vorteil in wissenschaftlicher und speziell in industrieller Stärke; aber ein solcher Vorteil kann leicht über den Haufen geworfen werden.

13.3. Vor der Unterwerfung Deutschlands bestand jederzeit die Möglichkeit, daß deutsche Wissenschaftler und Ingenieure Atombomben entwickelten, wirksam genug, um den Lauf des Krieges zu ändern. So gab es keine Wahl, es mußte hierzulade daran gearbeitet werden. Im Anfang konnten viele Wissenschaftler hoffen — und hofften auch wirklich —, daß sich gewisse Prinzipien herausstellen würden, aus denen hervorgehe, daß Atombomben in sich unmöglich seien. Diese Hoffnung schwand allmählich; glücklicherweise stellte sich zur gleichen Zeit die Größe des erforderlichen industriellen Aufwandes als so gewaltig heraus, daß die Furcht vor einem deutschen Erfolg sich abschwächte, noch bevor das Ende kam. Aus den gleichen Gründen sind die meisten von uns überzeugt, daß die Japaner diese Waffe weder entwickeln noch benutzen können.

VORAUSSAGE

13.4. Was die Zukunft anlangt, so läßt sich vermuten, daß die technische Entwicklung nach zwei Richtungen verlaufen wird. Vom militärischen Standpunkt ist vernünftigerweise zu erwarten, daß Fortschritte sowohl in der Erzeugung des spaltfähigen Materials wie in dessen Gebrauch gemacht werden. Es ist denkbar, daß vollständig andre Methoden zur Verwandlung von Materie in Energie entdeckt werden; erinnern wir uns, daß die bei der Uranspaltung nutzbar gemachte Energie nur etwa $^1/_{10}$ % seiner Masse entspricht. Ließe sich ein Verfahren ent-

wickeln, das nur einige wenige Prozent der Stoffmenge irgendeines gewöhnlichen Materials in Energie verwandelt, so hätte die Zivilisation das Mittel in der Hand, freiwillig Selbstmord zu begehen.

13.5. Aber die Kernenergie bietet auch Möglichkeiten zu nichtzerstörerischem Gebrauch, und die zweite Richtung, in der man eine technische Entwicklung erwarten kann, weist auf den Pfad des Friedens. Im Herbst 1944 hat General *Groves* ein Komitee eingesetzt, das diese letzteren Möglichkeiten ebensowohl ins Auge fassen soll wie die, welche militärische Bedeutung haben. Dieses Komitee (Dr. *R. C. Tolman,* Vorsitzender; Konteradmiral *E. W. Mills* (USN) mit Captain *T. A. Solberg* (USN), Stellvertreter; Dr. *W. K. Lewis* und Dr. *H. D. Smyth)* erhielt eine Vielzahl von Vorschlägen über die verschiedenen Projekte, hauptsächlich in Richtung auf den Gebrauch der Kernenergie zur Energie-Erzeugung und die Benutzung radioaktiver Nebenprodukte zu wissenschaftlichen, medizinischen und industriellen Zwecken. Während man allgemein der Ansicht war, daß schließlich eine große Industrie entstehen könnte, die mit der Elektroindustrie möglicherweise vergleichbar sei, bestand Meinungsverschiedenheit darüber, wie schnell eine solche Industrie emporwachsen werde; man war sich darüber einig, daß das Wachstum während einer Periode von vielen Jahren langsam vor sich gehen werde. Zumindest besteht keine unmittelbare Aussicht, Automobile mit Kernenergie zu betreiben oder Häuser mit radioaktiven Lampen zu beleuchten, obwohl es ziemlich wahrscheinlich ist, daß für spezielle Zwecke Kernenergie innerhalb von 10 Jahren entwickelt werden kann, und daß genügend reichliche Mengen radioaktiver Stoffe einen tiefen Einfluß auf die wissenschaftliche Forschung und vielleicht auf die Behandlung gewisser Krankheiten innerhalb einer ähnlichen Zeitspanne gewinnen kann.

Zukunftspläne

13.6. Während der Kriegsdauer galt die Anstrengung der Erzielung maximaler militärischer Resultate. Schon seit einiger Zeit war es klar geworden, daß eine gewisse Kontrolle und Unterstützung seitens der Regierung auf dem Gebiet der Kernenergie auch nach dem Krieg aufrecht erhalten werden müsse. Viele von den

Männern, die sich mit dem Projekt befaßten, haben diese Tatsache erkannt und verschiedene Vorschläge gemacht, von denen einige von dem Tolman-Komitee in Betracht gezogen wurden, obwohl es nur ein befristetes Beratungskomitee zur Information von General Groves war. Ein Interimskomitee von hoher Kompetenz ist nun damit beschäftigt, Pläne für eine Dauerorganisation zu entwerfen. Dieses Komitee diskutiert auch Fragen des weiteren Vorgehens, womit sich viele der nachdenklicheren Mitarbeiter eingehend befaßt haben, seit das Werk begonnen wurde und insbesondere seit sein Erfolg mehr und mehr an Wahrscheinlichkeit gewann.

Die dem Volk vorzulegenden Fragen

13.7. Wir finden uns im Besitz eines explosiven Stoffes, der noch weit von seiner Vollendung entfernt ist. Doch schon sind die Zukunftsmöglichkeiten solcher Explosivstoffe erschreckend, und ihre Auswirkungen auf künftige Kriege und internationale Angelegenheiten sind von entscheidender Bedeutung. Hier liegt ein neues Werkzeug der Menschheit vor, ein Werkzeug von unvorstellbarer Zerstörungskraft. Seine Entwicklung erhebt viel Fragen, die in naher Zukunft beantwortet werden müssen.

13.8. Zufolge der Beschränkungen, die von der militärischen Sicherheit auferlegt wurden, gab es keine Möglichkeit für das Parlament oder das Volk, derartige Fragen zu diskutieren. Sie wurden aber von allen Beteiligten ernsthaft geprüft und im Kreise der Wissenschaftler lebhaft besprochen, und die gezogenen Schlüsse wurden bis zu den höchsten Amtsstellen weitergeleitet. Diese Fragen sind nicht technischer Natur; es sind politische und soziale Fragen, und die Antworten, die darauf gegeben werden, können für die ganze Menschheit auf Generationen von Einfluß sein. Über alle diese Fragen haben die Männer des Unternehmens nachgedacht als Bürger der Vereinigten Staaten, welche lebhaft interessiert sind an der Wohlfahrt des Menschengeschlechts. Es war ihre Pflicht und zugleich die Pflicht der verantwortlichen hohen Regierungsstellen, die über die Grenzen des gegenwärtigen Krieges und seiner Waffen hinaus ihren Blick auf die letzten Konsequenzen dieser Entdeckungen zu richten hatten. Das war eine schwere Verantwortung. In einem freien Land wie dem un-

sern sollten derartige Fragen vom Volk diskutiert werden, und die Entscheidungen sollten vom Volk durch seine Vertreter getroffen werden. Das ist einer der Gründe für die Veröffentlichung dieses Berichtes. Der Bericht ist populär-technisch abgefaßt in der Hoffnung, daß Männer der Wissenschaft in diesem Land ihn benützen können, ihren Mitbürgern zu helfen, weise Beschlüsse zu fassen. Die Bevölkerung dieses Landes muß unterrichtet sein, wenn sie sich ihrer Verantwortung weise entledigen soll.

ANHANG 1. METHODEN ZUR BEOBACHTUNG SCHNELLER TEILCHEN AUS KERNREAKTIONEN

In Kapitel I wurde die Wichtigkeit der Ionisation für die Untersuchung der Radioaktivität dargelegt und das Elektroskop erwähnt. In diesem Anhang werden wir eine Methode von historischer Wichtigkeit erwähnen, welche dem Elektroskop vergleichbar ist, jedoch gegenwärtig nicht mehr verwendet wird, um sodann die verschiedenen jetzt angewandten Methoden zu betrachten, die man zur Beobachtung von Alpha-Partikeln, Beta-Partikeln (oder Positronen), Gamma-Strahlen, Neutronen und deren Wirkungen benutzt.

Scintillationen

Die dichteste Annäherung an das «Sehen» eines Atoms ist die Beobachtung des hellen Aufleuchtens eines Lichtblitzes, den ein Alpha-Partikel oder ein sehr schnelles Proton beim Auftreffen auf einen Fluoreszenzschirm erregt. Dazu ist nichts notwendig als ein Glasstück, das mit einer Schicht von Zinksulfid bedeckt ist, ein schwach vergrößerndes Mikroskop, ein Dunkelraum, ein gut ausgeruhtes Auge und eine Alpha-Strahlenquelle. Die meisten der berühmten Experimente Rutherfords, einschließlich der in § 1.17 erwähnten, sind durch Scintillations «Zählung» gemacht worden, aber die Methode ist mühsam, und soviel der Autor weiß, wurde sie durch elektrische Methoden vollständig verdrängt.

Der Ionisationsprozess

Wenn ein schnelles geladenes Teilchen, wie etwa ein Alpha-Teilchen oder ein schnelles Elektron durch Materie hindurchgeht, zerreißt es die Moleküle, die es trifft, auf Grund der elektrischen Kräfte, die zwischen dem geladenen Partikel und den

Elektronen im Molekül bestehen[1]. Wenn das Material gasförmig ist, können sich die resultierenden Bruchstücke oder Ionen voneinander wegbewegen, und wenn ein elektrisches Feld vorhanden ist, wandern die aus den Molekülen herausgeschlagenen Elektronen in die eine Richtung und die positiven Restionen in die andere Richtung. Ein Beta-Teilchen von der Energie einer Million Elektronvolt erzeugt etwa 18 000 ionisierte Atome, bevor es vollständig stillgelegt ist; denn durchschnittlich braucht es ungefähr 60 Volt Energie für jeden mit Ionisation verbundenen Zusammenstoß. Da jeder Ionisationsprozeß ein positives und ein negatives Ion liefert, werden im ganzen 36 000 Ladungen durch ein solches schnelles Elektron freigesetzt; aber weil jede Ladung nur von der Größe $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb ist, beträgt die Gesamtladung nur etwa $6 \cdot 10^{-15}$ Coulomb, ist also sehr klein. Das beste Galvanometer kann etwa eine Ladung von 10^{-10} Coulomb messen. Die Empfindlichkeit eines Elektrometers läßt sich bis auf ungefähr 10^{-16} Coulomb herauftreiben, aber das Elektrometer ist ein im Gebrauch recht unbequemes Instrument.

Die Zahl der von einem Alpha-Partikel erzeugten Ionen ist mit der von einem Beta-Teilchen erzeugten vergleichbar. Das Alpha-Teilchen wird schneller stillgelegt, aber es erzeugt pro Längeneinheit auf seinem Weg mehr Ionen. Ein Gamma-Strahl ist weit weniger wirksam als Ionisator, weil der Vorgang selbst wesentlich anders verläuft. Der Gammastrahl setzt gelegentlich durch einen Compton-Streuprozeß oder einen photoelektrischen Prozeß ein Elektron aus einem Molekül frei, und dieses sekundäre Elektron besitzt genug Energie, selbst Ionisation hervorzurufen. Ein Neutron erzeugt, wie wir im Text bereits erwähnten, Ionisation nur indirekt dadurch, daß es bei elastischen Zusammenstößen einem Kern hohe Geschwindigkeit erteilt, oder dadurch, daß es einen Kern spaltet, wobei die Spaltstücke Ionisation herbeiführen.

Wenn uns die Aufgabe gestellt ist, die Ionisationswirkungen dieser Teilchen zu erforschen, müssen wir offenbar die resultierende Wirkung von einem großen Haufen Partikel heranziehen oder hochempfindliche Mittel zur Messung der elektrischen Ströme benutzen.

---

[1] Genauer: es kommt zur Abtrennung eines oder mehrerer Elektronen vom getroffenen Molekül.

Das Elektroskop

Das Elektroskop zeigt im wesentlichen an, bis zu welchem Grad die Luft in seiner unmittelbaren Umgebung infolge der in ihr erzeugten Ionen leitfähig geworden ist.

Die einfachste Form des Elektroskops ist ein Goldblattstreifen von einigen cm Länge, der mit Hilfe eines Gelenks an einem vertikalen isolierten Stab aufgehängt wird. Wenn der Stab geladen ist, erhält auch das Goldblatt die gleiche Ladung und schlägt durch die Abstoßung gleicher Ladung um einen Winkel aus. Geht die Ladung weg, so wandert das Blatt allmählich zu dem Stab zurück, und die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist ein Maß für die Leitfähigkeit der umgebenden Luft.

Eine widerstandsfähigere Form dieses Elektroskops wurde von *C. C. Lauritsen* entworfen, der das Goldblatt durch einen Quarzfaden ersetzte und die Elastizität des Fadens als Rückstellkraft statt der Schwerkraft benutzte. Der Faden wird durch eine dünne Metallhaut leitend gemacht. Das Instrument wird gleichfalls geladen, und der Faden geht von seiner ursprünglichen Ablenkung allmählich in die ungeladene Position zurück. Die Stellung des Fadens ist mit einem schwachen Mikroskop ablesbar. Diese Instrumente kann man tragbar und widerstandsfähig und ziemlich empfindlich machen. Sie dienen als Standard-Instrumente zur Messung des Betrags der Gamma-Strahlung, insbesondere zur Sicherheitsmessung gegen gefährliche Exposition.

Ionisationskammern

Eine Ionisationskammer mißt die Gesamtzahl der in ihr direkt erzeugten Ionen. Gewöhnlich besteht sie aus zwei ebenen Elektroden, zwischen denen ein elektrisches Feld von genügender Stärke besteht, um alle Ionen vor ihrer Rekombination an die Elektroden zu ziehen, jedoch nicht so stark, daß sekundäre Ionen wie in den nunmehr zu beschreibenden Instrumenten entstehen.

Bei sorgfältigem Arbeiten und Benützen empfindlicher Verstärker kann eine Ionisationskammer bereits die kleine Anzahl von Ionen anzeigen, die von einem Alpha-Partikel erzeugt wird; sie kann aber auch ganz ähnlich wie ein Elektroskop dazu benutzt werden, den Gesamtbetrag einer augenblicklich vorhande-

nen ionisierenden Strahlung festzustellen oder auch so, daß sie die Gesamtionisation, die über eine endliche Zeit erzeugt wird, angibt.

PROPORTIONALZÄHLER

Während die Ionisationskammern so gebaut werden können, daß sie auf ein einziges Gamma-Partikelchen reagieren, ist es weit zweckmäßiger, eine Selbstverstärkungsanordnung zu benutzen, d. h. eine Anordnung, bei der die zuerst erzeugten Ionen weitere Ionen in der gleichen Region hervorbringen, so daß die Verstärkungsstromkreise nicht so empfindlich zu sein brauchen.

In einem Proportionalzähler besteht eine Elektrode in einem feinen Faden entlang der Achse der zweiten Elektrode, die einen Hohlzylinder bildet. Die Wirkung des Drahtes besteht in der Erzeugung einer großen elektrischen Feldstärke in seiner nächsten Umgebung auch bei relativ geringen Potentialdifferenzen zwischen ihr und der andern Elektrode. Diese hohe Feldstärke beschleunigt die primären Ionen sehr, die von Alpha-Strahlen oder Beta-Strahlen oder Photonen stammen; und diese beschleunigten Primärionen (insbesondere die Elektronen) erzeugen ihrerseits wieder Sekundärionen im Füllgas des Zählers, so daß der ganze Stromstoß beträchtlich gesteigert wird.

Man kann diese Zähler so entwerfen und benutzen, daß die Gesamtzahl der gebildeten Ionen proportional zu der Zahl der Primärionen wird. Auf diese Weise kann nach Verstärkung der Stoß in einem Oscilloskop sichtbar gemacht werden. Die Höhe des Stoßes gibt an, wie stark die Ionisierungswirkung des ersten Partikelchens war. Es ist sehr leicht, auf diese Weise zwischen Alpha-Partikeln und Beta-Partikeln und Photonen zu unterscheiden, und die Stromkreise können so angeordnet sein, daß nur Stöße oberhalb einer gewählten Größe gezählt werden. Auf diese Weise kann ein Proportionalzähler die Alpha-Teilchen auf einem Hintergrund von Beta-Teilchen zählen oder er kann sogar lediglich solche Alpha-Teilchen zählen, die mehr als eine bestimmte Energie besitzen.

GEIGER-MÜLLER-ZÄHLER

Wenn die Spannung des Proportionalzählers gesteigert wird, gibt es einen Punkt, bei dem die Primärionen von einem einzel-

nen Alpha-Partikel, Beta-Partikel oder Photon eine Entladung durch den ganzen Zähler einleiten, also nicht nur die Zahl der Primärionen an ihrem Erzeugungsort vermehren. Dies ist ein Auslösungsvorgang. Der Strom ist unabhängig von der Anzahl der erzeugten Ionen; außerdem würde der Strom unbegrenzt weiterfließen, wenn man nicht Maßnahmen träfe, ihn zu löschen. Diese Unterdrückung kann man durch Anordnungen der äußeren Stromkreise vollständig herbeiführen, und zwar derart, daß die Spannung absinkt, sobald der Stromstoß einsetzt; oder aber dadurch, daß man eine Mischung von Gasen im Zähler benutzt, durch welche die Elektrodenoberfläche «vergiftet» wird, sobald die Entladung hindurchgeht und so vorübergehend die weitere Emission von Elektronen verhindert, oder durch Kombination beider Methoden.

Der Geiger-Müller-Zähler wurde vor dem Proportionalzähler entwickelt und bleibt das empfindlichste Instrument, um ionisierende Strahlen zu beobachten. Aber er «zählt» jede ionisierende Strahlung, die hindurchgeht, gleichviel, ob es sich um ein Alpha-Partikel, Proton, Elektron oder Photon handelt.

Die Kunst der Zählermessungen

Es ist *eine* Sache, die Prinzipien der verschiedenen Ionisationskammern, Zähler und dergleichen zu beschreiben, und es ist eine *andere* Sache, sie zu konstruieren und erfolgreich damit umzugehen.

In erster Linie müssen ja die Wände der Zählkammern den Teilcheneintritt in den Zähler gestatten. Das ist für Gamma-Strahlen eine einfache Angelegenheit, aber für relativ langsame Elektronen oder Positronen oder Alpha-Strahlen müssen die Zählerwände ganz dünn gemacht werden oder es müssen ganz dünne Fenster darin eingebaut werden.

Ferner besteht eine große Mannigfaltigkeit in den Einzelheiten des Zählers selbst, in Abstand und Größe der Elektroden, Art der Gasfüllung, deren Druck usw.

Schließlich ist die Deutung der erhaltenen Daten eine heikle Angelegenheit. Die Absorption der Zählerwände und jedes außen liegenden absorbierenden Stoffes muß in Rechnung gestellt werden; die geometrische Lage des Zählers in bezug auf die Strah-

lenquelle muß bei der Umdeutung der beobachteten Zählerausschläge in die tatsächliche Anzahl der Kernereignisse berücksichtigt werden. Endlich, aber nicht immer in letzter Linie, müssen die statistischen Schwankungen in Betracht gezogen werden, weil alle Kernreaktionen durch Wahrscheinlichkeitsgesetze bestimmt sind.

Die Wilson-Nebelkammer

Es gibt eine Methode, Kernteilchen zu beobachten, die zwar direkt von der Ionisation abhängt, aber nicht eine elektrische Methode darstellt. Sie benutzt die Tatsache, daß übersättigter Dampf leichter an Ionen als an neutralen Molekülen kondensiert. Wenn mit Wasser gesättigte Luft durch Expansion abgekühlt wird, und zwar gerade im Augenblick nach Durchgang von Alpha-Partikeln, finden sich feine Kondensations-Wassertröpfchen an den von den Alpha-Partikeln gebildeten Ionen und reflektieren helles Licht so stark, daß man es sieht oder photographieren kann. Auf diese Weise läßt sich der tatsächliche Weg der Alpha-Partikel aufzeichnen.

Diese Methode, von *C. T. R. Wilson* in Cambridge, England, im Jahre 1912 entwickelt hat sich als überaus nützlich für das Studium des Verhaltens der einzelnen Partikel wie Alpha-Strahlen, Protonen, Elektronen, Positronen, Mesotronen, Photonen erwiesen, ebenso für das Studium der schnellen Atome, die durch Zusammenstöße mit Alpha-Teilchen, Protonen oder Neutronen entstehen. Im Gegensatz zu der Scintillationsmethode, die so manche Jahre mit ihr zusammen angewandt wurde, ist die Wilsonmethode nicht verdrängt worden und wird noch jetzt in weitem Umfange benutzt, und zwar ganz besonders beim Studium der Einzelheiten von Zusammenstößen zwischen Kernteilchen und Atomen.

Die photographische Methode

Auch in photographischen Emulsionen lassen sich die Spuren der einzelnen durch Materie wandernden Partikel beobachten[1]. Aber die Weglängen sind hierbei so klein, daß man sie mikro-

---

[1] Um dieses Verfahren hat sich insbesondere die Physikerin *Marietta Blau* verdient gemacht.

skopisch untersuchen muß. Unter dem Mikroskop erscheinen sie als eine Reihe entwickelter Körner, die den Durchgang des Partikels markieren. Diese Untersuchungsmethode bedarf praktisch keiner Apparatur, aber sie ist mühsam und von begrenztem Nutzen. Immerhin kann man die allgemeine Schwärzung eines photographischen Films als Maßstab der gesamten Bestrahlung benutzen, und dieser Vorgang wurde angewandt sowohl als Ergänzung als auch als Ersatz für die Elektroskope, die man bei der Sicherheitskontrolle in vielen Teilen des Projekts benutzt hat.

Die Beobachtung und Messung von Neutronen

Keine der beschriebenen Methoden läßt sich direkt auf Neutronen anwenden. Aber alle sind indirekt brauchbar, weil Neutronen indirekte Ionen erzeugen. Dies geschieht auf zwei Wegen — durch elastischen Zusammenstoß oder durch Kernreaktion. Wie wir schon beschrieben haben, kommt ein schnelles Neutron beim Durchgang durch Materie gelegentlich so dicht an einen Atomkern heran, daß es diesem einen erheblichen Impuls und eine erhebliche Energie gibt im Einklang mit den Gesetzen des elastischen Zusammenstoßes. Hierbei wird der Kern zu einem schnellen geladenen Partikel, der in einer Ionisationskammer oder in einem Zähler oder in einer Nebelkammer Ionisation erzeugt. Handelt es sich aber um ein langsames Neutron, z. B. ein thermisches, dann erhält der getroffene Kern nicht genug Energie, um Ionisation herbeizuführen. Wenn andererseits das Neutron absorbiert wird und der getroffene Kern mit Energiefreigabe aufspaltet, dann wird Ionisation erzeugt. So hat man für das Auffinden schneller Neutronen die Wahl zwischen elastischen Zusammenstößen und Kernreaktionen; aber für Neutronen mit thermischen Geschwindigkeiten steht nur die Kernreaktion zur Verfügung.

Die am allgemeinsten benutzte Reaktion ist die ${}_5B^{10}$ (n, α) ${}_3Li^7$-Reaktion, bei der ungefähr 2,5 Mev Energie freiwerden, die sich auf das resultierende Alpha-Partikel und den ${}_3Li^7$-Kern verteilt. Das ist reichlich genug, um Ionisation zu erzeugen. Diese Reaktion benutzt man so, daß man Ionisationskammer oder einen Proportionalzähler mit Bor-Trifluorid-Gasfüllung füllt, so daß die Reaktion da erfolgt, wo man die Ionisation braucht; als andere

Möglichkeit läßt sich das Innere der Kammer oder des Zählers mit Bor einfassen. Die Ionisationskammer dient dann als Instrument zur Messung des gesamten Neutronenstroms, während der Proportionszähler die Anzahl der einzelnen Neutronen anzeigt.

Eine der wertvollsten Methoden zur Messung der Neutronendichte durch Kernreaktion hängt von der Erzeugung künstlicher radioaktiver Kerne ab. Hierbei wird eine Folie, von der man weiß, daß sie durch Neutronenbombardements radioaktiviert wird, an dem Ort eingefügt, an dem man die Neutronenintensität kennenlernen will. Nach einer gegebenen Zeit wird sie entfernt und ihre Radioaktivität mit einem Elektroskop oder Zähler gemessen. Der Grad der so erregten Aktivität ist dann ein Maß für die Anzahl der absorbierten Neutronen. Diese Methode hat den offensichtlichen Nachteil, daß sie keine sofortige Auskunft gibt wie die Ionisationskammer oder der Zähler.

Eine der interessantesten Methoden, die man bei dem Projekt entwickelte, besteht in der Uranspaltung als Kernreaktion für die Neutronenermittlung. Überdies kann durch Trennung der Isotope zwischen schnellen und langsamen Neutronen unterschieden werden.

Da die Wahrscheinlichkeit für das Zustandekommen einer Neutronenreaktion für jede Reaktionsart und für jede Neutronengeschwindigkeit verschieden ist, sind die Schwierigkeiten, aus den Zähler- oder Strommessungen auf Anzahl und Schnelligkeit der vorhandenen Neutronen zu schließen, noch größer als für andre Partikel. Niemand darf überrascht sein, wenn zwei fähige Forscher für vermutlich den gleichen Kernvorgang zu verschiedenen Zahlenwerten kommen. Nur durch verwickelte Serien ineinandergreifender Experimente und deren sorgfältige Vergleiche und Interpretationen können die fundamentalen Tatsachen aus den experimentellen und instrumentellen Variablen entwirrt werden.

ANHANG 2. DIE EINHEITEN VON MASSE, LADUNG UND ENERGIE

Masse

Da Proton und Neutron die Grundteilchen sind, aus denen alle Kerne gebildet werden, scheint es natürlich, die Masse des einen oder andern von ihnen als Einheitsmasse zu benutzen. Man würde vermutlich das Proton wählen, weil das der Kern des Wasserstoffatoms ist. Aber es gibt gute Gründe, historische und andere, warum man weder das Proton noch das Neutron wählt. Statt dessen ist die als Einheit benutzte Masse in der Atomphysik und Kernphysik ein Sechzehntel der Masse des überwiegenden Sauerstoffisotops O^{16} und beträgt $1{,}6603 \cdot 10^{-24}$ gr. In dieser Einheit ausgedrückt beträgt die Masse des Protons 1,00758 und die Masse des Neutrons 1,00893. (Die Chemiker benutzen gewöhnlich eine Masseneinheit, die hiervon ein klein wenig abweicht.)

Ladung

Die Einheit der elektrischen Ladung, die man in der Kernphysik benutzt, ist die positive Ladung des Protons. Sie ist an Größe der Ladung des Elektrons gleich, hat entgegengesetzte Vorzeichen und wird deshalb oft Elektronenladung genannt. Eine Elektronenladung beträgt $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb. Erinnern wir uns, daß ein Strom von einem Ampère während einer Sekunde Dauer die Ladung ein Coulomb mit sich führt; eine Elektronenladung ist somit gleich $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Amp. Sek.[1]

Energie

Die in der Kernphysik benutzte Energieeinheit ist das Elektronvolt und wird definiert als gleich derjenigen kinetischen Energie, die ein einmal geladenes Partikel bei freiem Fall durch

[1] Stromstärke 1 Ampère bedeutet also, daß rund $6{,}2 \cdot 10^{18}$ (sechs Trillionen) Elektronen pro Sekunde den Querschnitt der Leitung durchqueren.

eine Potentialdifferenz von einem Volt erreicht. Häufig ist es zweckmäßig, statt dessen die eine millionmal größere Einheit: Million-Elektron-Volt (Mev) anzuwenden.

Die folgende Tafel gibt die Beziehungen zwischen Elektronvolt und anderen gebräuchlichen Energie-Einheiten wieder:

UMRECHNUNGSTAFEL FÜR ENERGIE-EINHEITEN

Multipliziere	*mit*	*Ergebnis*
Mev	$1{,}07 \cdot 10^{-3}$	Massen-Einheiten
	$1{,}60 \cdot 10^{-6}$	erg
	$3{,}83 \cdot 10^{-14}$	cal
	$4{,}45 \cdot 10^{-20}$	kWh
Massen-Einheiten	$9{,}31 \cdot 10^{2}$	Mev
	$1{,}49 \cdot 10^{-3}$	erg
	$3{,}56 \cdot 10^{-11}$	cal
	$4{,}15 \cdot 10^{-17}$	kWh
erg	$6{,}71 \cdot 10^{2}$	Massen-Einheiten
	$6{,}24 \cdot 10^{5}$	Mev
	$2{,}39 \cdot 10^{-8}$	cal
	$2{,}78 \cdot 10^{-14}$	kWh
cal	$2{,}81 \cdot 10^{10}$	Massen-Einheiten
	$2{,}62 \cdot 10^{13}$	Mev
	$4{,}18 \cdot 10^{7}$	erg
	$1{,}16 \cdot 10^{-6}$	kWh
kWh	$2{,}41 \cdot 10^{16}$	Massen-Einheiten
	$2{,}25 \cdot 10^{19}$	Mev
	$3{,}60 \cdot 10^{13}$	erg
	$8{,}60 \cdot 10^{5}$	cal

ANHANG 3. VERZÖGERTE NEUTRONEN DER URANSPALTUNG

Wie in Kapitel VI dargelegt, wird die Beherrschung einer Kettenreaktionseinheit in hohem Maße durch die Tatsache erleichtert, daß einige von den Neutronen aus der Uranspaltung erst mehr als eine Sekunde nach der Spaltung ausgesandt werden. Das experimentelle Studium dieses Effekts war somit von Wichtigkeit. *Snell, Nedzel* und *Ibser* beschrieben solche Experimente in einem Bericht vom 15. Mai 1942, aus dem wir folgendes wiedergeben:

„Das vorliegende Experiment besteht aus zwei zusammenhängenden Teilen; einer betrifft die Abfallkurve, der andere die Intensität der verzögerten Neutronen, gemessen im Maßstab der »momentanen« Spaltungsneutronen.

Die Abfallkurve der verzögerten Neutronen

„Als Neutronenquelle wurde die Berylliumscheibe (»target«) des Cyclotrons der Universität von Chicago benutzt, die mit einem Deuteronen-Strahlenbündel von bis zu 20 Mikro-Ampère und 8 Mev bombardiert wurde. Nahe der Zielscheibe war eine Hohlform aus verzinntem Stahl angebracht, die 106 Pfund[1] von U_3O_8 enthielt. Sie war umgeben von einer Paraffinschicht von ungefähr 2 Zoll[2]. Das Innere der Schale war mit Paraffin gefüllt, ausgenommen ein axiales Loch, in dem ein mit BF_3 gefüllter Proportionalzähler untergebracht war. Der Zähler war über einen Verstärker mit einem Untersetzungsstromkreis (Untersetzungsverhältnis 64 : 1, »scale of 64«) verbunden, der mit interpolierenden Lampen (interpolating lights) und einem Cenco-Impulszähler ausgerüstet war. Ein Zehntelsekunden-Zeitschreiber mit Synchronantrieb und eine Hundertstelsekunden-Stoppuhr waren auf dem Schaltbrett des Untersetzungskreises aufmontiert dicht bei

---

[1] Ein englisches Pfund = 453,59 gr.
[2] Zoll = 2,54 cm.

den interpolierenden Lampen und dem Impulszähler. Die Gruppe von Zifferblättern und Lampen wurde mit passend variierten Geschwindigkeiten mit einer Sept-Camera, die von Hand bedient wurde, gefilmt. Das Resultat war eine Aufzeichnung von Zeiten und Zahlen auf einem Filmstreifen, nach denen die Zerfallskurven gezeichnet wurden.

„Man ging folgendermaßen vor: Während des Bombardements wurde die Stoppuhr in Gang gesetzt, und der Zeitschreiber lief dauernd. Der Zähler und Verstärker waren eingeschaltet, aber die Impulse des Verstärkers wurden zur Erde abgeleitet. Der Untersetzer wurde auf null gestellt. Nach einem Ankündigungssignal wurde durch einen der Experimentatoren das Cyclotron abgeschaltet, während der andere den Verstärkerstrom von der Erdung auf den Untersetzer umschaltete und zu photographieren begann. Es war leicht, die erste Photographie innerhalb einer halben Sekunde nach Abschaltung des Cyclotrons aufzunehmen. 60 bis 100 Photographien wurden während eines typischen Versuchsablaufs aufgenommen. Die Notwendigkeit, sowohl eine Stoppuhr als auch einen Zeitschreiber zu benutzen, stammt von der Tatsache, daß die Genauigkeit einer Hundertstelsekunden-Stoppuhr für die kleinen Zeitintervalle zwischen den Photographien während des Anfangsteils des Ablaufs benötigt wurde. Die Uhr lief aber ab und blieb stehen, bevor die Zählung vollständig war. So ergab der Zeitschreiber hinreichende Genauigkeit für die späteren Zeitintervalle.

„Einige 40 Abläufe wurden unter verschiedenen experimentellen Bedingungen aufgenommen. Kurze Bestrahlungen von 1—2 Sekunden Dauer wurden vorgenommen, um kurzzeitige Perioden am besten auflösen zu können. Lange und starke Bombardierungen von 15—20 Minuten Dauer, so dicht wie möglich an der Zielscheibe (target) wurden benutzt, um die über längere Zeiten anhaltenden Aktivitäten mit einer Maximalintensität zu bekommen. Einige Bombardements von 5 Minuten Dauer wurden gemacht, wobei das Strahlenbündel des Cyclotrons so konstant wie möglich gehalten wurde, um die relativen Sättigungsintensitäten der verschiedenen Radioaktivitäten zu untersuchen. Bei diesen Aktivierungen reduzierte man den Cyclotronstrahl auf 1—2 Mikro-Ampère, um zu verhindern, daß die Anfangsgeschwindigkeit der

Zählung zu hoch für den Zähler wurde. (300 Zählungen pro Sekunde waren als vernünftige obere Grenze für eine zuverlässige Zählung angenommen.) Es standen 2 BF_3-Zähler zur Verfügung, einer mit einem Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen von 2,66 cm^2 und der andere von 0,43 cm^2. Nach starker Aktivierung konnten wir den Abfall der verzögerten Neutronen etwa 13 Minuten lang verfolgen. Untergrundzählungen[1] (vermutlich hauptsächlich durch Neutronen von spontanen Spaltungen verursacht) wurden besonders gemessen und von den Ablesungen abgezogen. Sie betrugen etwa 0,4 pro Sekunde für den großen Zähler.

„Die Untersuchung all dieser Abfallskurven ergibt als allgemeines Bild der vorhandenen Neutronen emittierenden Aktivitäten das folgende:

TAFEL 1

Halbwertszeit	*Relative Anfangsintensität bei Sättigungsaktivierung*
57 ± 3 sec.	0,135
24 ± 2 sec.	1,0
7 sec.	1,2
2,5 sec.	1,2

„Keine Aktivitätsperiode, die länger dauert als 57 Sekunden, erschien, selbst wenn wir das intensivste Bombardement, das wir herstellen konnten, über 20 Minuten Dauer wirken ließen. Die wiedergegebenen relativen Anfangsintensitäten sind die Mittelwerte dreier Kurven.

„Diese Resultate liefern die folgende Gleichung für die Abfallkurve der verzögerten Neutronen nach Aktivierungssättigung:

$$\text{Aktivierung} = \text{constans} \cdot (1{,}2e^{-0{,}28\,t} + 1{,}2e^{-0{,}099\,t} + 1{,}0e^{-0{,}029\,t} + 0{,}135e^{-0.012\,t})$$

wobei t die Zeit in Sekunden bedeutet."

Der zweite Teil des Experimentes bestand in der Messung der Gesamtanzahl der ausgesandten Neutronen innerhalb des Zeit-

[1] Solcher Ausschläge, die nicht von dem zu messenden Vorgang stammen, sondern von anderen Ursachen. Für spontane Spaltungen besteht eine sehr kleine, aber immerhin endliche Wahrscheinlichkeit.

intervalls von 0,01 Sekunden bis 2 Minuten nach Abschaltung des Cyclotrons. Unter der Annahme, daß alle verzögerten Neutronen in den vier im ersten Teil des Experiments gemessenen Gruppen enthalten sind, sagt dieses zweite Resultat, daß 1,0 ± 0,2 % der bei der Uranspaltung emittierten Neutronen mindestens 0,01 Sekunden Verzögerung erleiden und daß etwa 0,07 % Verzögerung von der Größenordnung einer Minute erleiden. Wenn man den effektiven Wert von k, des Multiplikationsfaktors für eine typische Betriebseinheit, zu nur 1,01 wählt, und zwar bei Beseitigung aller Regulierungen, und die gesamte Variation von k durch einen Kontrollstab 0,002 betragen läßt, genügt die Zahl der verzögerten Neutronen, um eine leichte Regulierung zu ermöglichen.

ANHANG 4. DIE ERSTE KETTENREAKTIONSEINHEIT MIT SELBSTÄNDIGEM LAUF

Im VI. Kapitel wurde die Konstruktion und Arbeitsweise der ersten sich selbst aufrecht erhaltenden Kettenreaktionseinheit kurz beschrieben. Obwohl Einzelheiten aus Sicherheitsgründen noch zurückgehalten werden müssen, geben die folgenden Paragraphen eine einigermaßen ausführliche Darstellung auf Grund eines Berichtes von *Fermi*. Diese Einheit wurde von *Fermi* und seinen Mitarbeitern im Herbst 1942 errichtet.

Beschreibung der Einheit

Der ursprüngliche Plan sah eine sphärische Form der Einheit vor, mit dem besten Material in der Nähe des Mittelpunktes. Durchgeführte Kontrollmessungen zeigten, daß die kritische Größe bereits erreicht wurde, bevor die Kugel vollständig war. Die Konstruktion wurde entsprechend geändert. Die schließlich gewählte Form kann man roh beschreiben als ein abgeplattetes Sphäroid ähnlich einem Türknauf. Man wünschte das Uranium oder die Uranium-Oxyd-Klumpen in einem kubischen Gitter, in Graphit eingebettet, anzuordnen. Folglich schnitt man den Graphit in ziegelförmige Stücke und schichtete diese in Lagen, von denen jede zweite Uranklumpen an den Ecken der Felder enthielt. Die kritische Größe wurde schon erreicht, als die Einheit auf $^3/_4$ derjenigen Höhe aufgeschichtet war, die sich bei den vorsichtigsten Schätzungen als nötig ergeben hatte. Folglich fügte man nur noch eine einzige Schicht hinzu. Der benutzte Graphit stammte zur Hauptsache von der National Carbon Company und der Speer Graphite Company. Die Einheit enthielt 12 400 englische Pfund[1] Metall, die teilweise von Westinghouse, teilweise von Metal Hydrides und teilweise von Ames geliefert wurden. Da viel mehr Gitterpunkte als Metallbrocken vorhanden waren,

---

[1] Englisches Pfund = 453,59 gr.

wurden die übrigbleibenden mit komprimierten Oxydklumpen gefüllt.

Zum Zweck der Regulierung und zu experimentellen Zwecken waren 10 Rinnen durch die ganze Einheit durchgehend angeordnet. Drei von ihnen nahe dem Zentrum wurden für Regulierungs- und Sicherheitsstäbe benutzt. Um ferner das Experiment zu erleichtern, insbesondere die Entnahme der Proben, war eine Reihe der Graphitziegel, die Uranium führten und nahe dem Zentrum der Einheit vorbeigingen, so angeordnet, daß sie vollständig aus der Erzeugungseinheit herausgestoßen werden konnten.

Die ganze Graphitkugel ruhte auf einem Rahmenwerk aus Bauholz und stand auf dem Grund eines Spielplatzes unter der Westtribüne von Stagg-Field.

Die vorausgesagte Wirkungsweise der Einheit

Das Metallgitter in der Mitte der Einheit und die zwei anderen Hauptgitter, die den wichtigsten Teil der übrigen Einheit darstellten, wurden jedes getrennt in den Exponentialversuchen Nr. 18, 27 und 29 studiert. Die Versuche ergaben einen Multiplikationsfaktor von 1,07 für das Metallgitter und 1,04 und 1,03 für die Oxydgitter, wobei der Unterschied der beiden letzteren von der verschiedenen Menge des benutzten Graphits herrührte. Wir erinnern uns, daß diese Ziffern Multiplikationsfaktoren für unendliche Gitter sind. Folglich hing die Voraussage über den wirklichen Multiplikationsfaktor k_{eff} der Einheit, so wie sie nun gebaut war, davon ab, wieweit die Ableitung von k aus den Exponentialexperimenten gültig war, ferner von dem einwandfreien Durchschnittswert der verschiedenen Gitter und von der einwandfreien Ableitung des k_{eff} von dem durchschnittlichen k für unendliche Größe. Obwohl der ursprüngliche Entwurf der Einheit bewußt großzügig gewesen war, ergab der Erfolg, der eintrat, als sie nur teilweise vollendet war, daß die aus den Exponentialexperimenten berechneten Werte des Multiplikationsfaktors zu klein waren. Der beobachtete effektive Multiplikationsfaktor des tatsächlich aufgebauten Teils der geplanten Konstruktion war ungefähr 1,0006, wenn alle Neutronenabsorber entfernt waren.

Während des Aufbaus durchgeführte Messungen

Eine Reihe von Messungen wurden beim Aufbau der Einheit durchgeführt, um sicher zu sein, daß die kritischen Dimensionen nicht unvorbereitet erreicht wurden. Diese Messungen dienten auch dazu, die Neutronenvermehrungseigenschaften der Konstruktionen während des Aufbaus zu kontrollieren, und machten es möglich, vorauszusagen, wann die kritische Größe erreicht würde.

Im allgemeinen kann jeder Detektor für Neutronen oder Gamma-Strahlen zur Messung der Reaktionsintensität benutzt werden. Neutronendetektoren sind einigermaßen vorzuziehen, da sie die Resultate rascher liefern und durch die Strahlung der Spaltprodukte nach Abschaltung nicht angegriffen werden. Sowohl Neutronendetektoren (Bor-Trifluorid-Zähler) als auch Ionisationskammern für Gamma-Strahlen wurden innerhalb der Einheit und rings um die Einheit verteilt. Einige Ionisationskammern wurden benutzt, um Registrierinstrumente und automatische Sicherheitsregulatoren zu bedienen.

In der Einheit selbst wurden die Messungen mit zwei Typen von Detektoren gemacht. Ein Bor-Trifluorid-Zähler wurde in eine Rinne ungefähr 43 Zoll[1] vom Boden aus gerechnet eingesetzt und seine Angabe häufig abgelesen. Außerdem wurde ein Indiumblatt jede Nacht in einer Stellung so nahe wie möglich dem effektiven Mittelpunkt der Säule bestrahlt und dessen induzierte Aktivität am folgenden Morgen gemessen und die Ergebnisse mit den Ablesungen des Bor-Trifluorid-Zählers verglichen.

Die Resultate solcher Messungen kann man auf zwei Weisen ausdrücken. Da die Anzahl der sekundären, durch Spaltung erzeugten Neutronen stetig mit dem wachsenden Aufbau der Einheit zunimmt, wird auch die induzierte Aktivität A in der Standard-Indiumfolie im Zentrum stetig mit der wachsenden Zahl der Lagen in der Einheit zunehmen. Ist einmal der effektive Multiplikationsfaktor oberhalb 1, so müßte theoretisch A ins Unendliche wachsen. Eine solche Annäherung an das Unendliche ist schwer zu beobachten; darum benutzte man einen zweiten Weg, um die Resultate auszudrücken. Nehmen wir an, die Gitterdimension und die Reinheit des Materials des Graphit-Uranium-

[1] ca. 1 m.

Aufbaus seien so, daß für eine Konstruktion in Kugelform mit unendlich großem Radius der Multiplikationsfaktor gerade 1 wäre. Dann müßte für eine tatsächliche Kugel gleicher Konstruktion, aber mit endlichem Radius die Aktivierung eines im Mittelpunkt angeordneten Detektors proportional dem Quadrat des Radius sein. Es war nun möglich, den entsprechenden Effektiv-Radius R_{eff} für die tatsächliche Einheit in jeder ihrer verschiedenen Baustufen zu bestimmen. Daraus ergab sich der Schluß, daß,

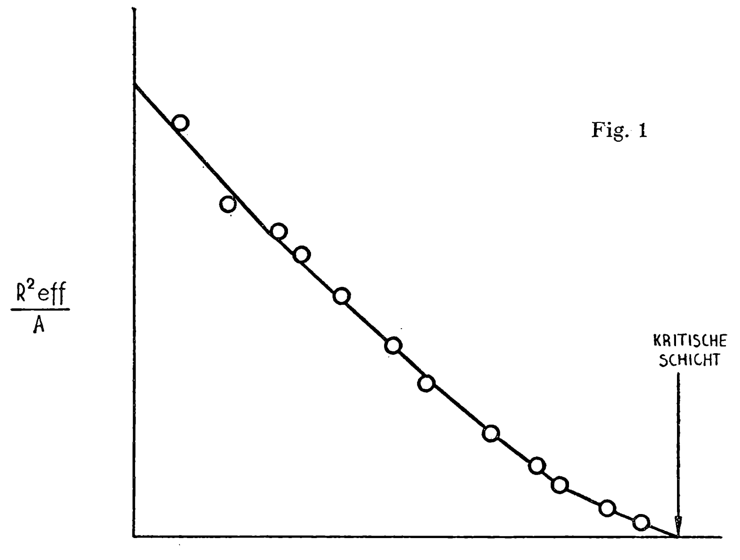
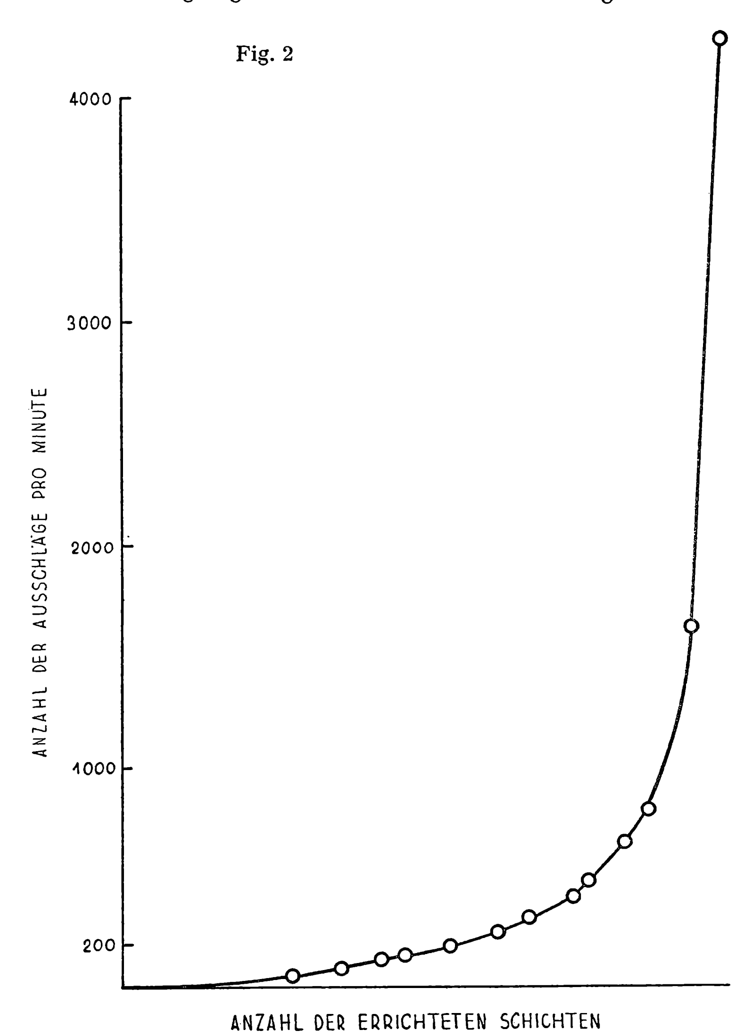


Fig. 1

wenn der durchschnittliche Wert des Faktors k_∞ für das Gitter in der Einheit genau 1 ist, die Aktivität A des Detektors im Mittelpunkt mit wachsendem R_{eff} so wachsen muß, daß R^2_{eff}/A konstant bleibt; aber wenn k_∞ für das Gitter größer ist als 1, dann muß, wenn die Größe der Einheit sich dem kritischen Wert nähert, also k_{eff} sich 1 nähert, A ins Unendliche wachsen und folglich R^2_{eff}/A sich null nähern. Folglich ist es möglich, durch Extrapolation einer Kurve R^2_{eff}/A in Abhängigkeit von der Größe der Einheit, d. i. von der Anzahl der Schichten, bis zu dem Punkt, an dem sie die Achse schneidet, vorauszusagen, an welcher

Schicht k_{eff} den Wert 1 erreicht. Eine solche Kurve, wie sie Figur 1 zeigt, gab an, mit welcher Schicht die kritische Größe erreicht würde. Eine weniger zweckmäßige, aber direktere und dramatischere Art, die Resultate aufzuzeigen, ist in Figur 2 zu sehen, die das Ansteigen der Neutronenaktivität in Abhängigkeit von den hinzugefügten Schichten der Einheit anzeigt.

Fig. 2



Während des Aufbaus und reichlich vor dem Erreichen der kritischen Schicht legte man einige Cadmiumstreifen in geeignete Rinnen ein. Sie wurden täglich einmal mit der nötigen Vorsicht herausgenommen, um die Annäherung an die kritischen Bedingungen zu kontrollieren. Auf diese Weise wurde der Aufbau bis zur kritischen Schicht vorangetrieben.

Regulierung

Die Reaktion wurde durch Einsetzen von einigen Neutronen absorbierenden Streifen — Cadmium oder Borstahl — reguliert. Bei Betriebsstillstand waren mehrere Cadmiumstreifen in eine Anzahl der Schlitze eingesetzt, wodurch der effektive Multiplikationsfaktor beträchtlich unterhalb 1 sank. Tatsächlich war jeder Cadmiumstreifen allein schon hinreichend, um die Einheit unter die kritische Bedingung zu bringen. Außer den Cadmiumstreifen, die man bei Handbedienung der Einheit benutzen konnte, waren zwei Sicherheitsstäbe und ein automatischer Kontrollstab vorgesehen. Der automatische Kontrollstab wurde durch zwei Elektromotoren bedient, die von einer Ionisationskammer und einem Verstärkersystem so abhingen, daß beim Anwachsen der Reaktion über das gewünschte Niveau der Stab hineingestoßen wurde und umgekehrt.

Der Betrieb der Einheit

Um die Einheit in Betrieb zu setzen, wurden alle Cadmiumstreifen bis auf einen herausgezogen. Der übbrigbleibende Streifen wurde dann langsam herausgezogen. Im Augenblick, in dem die kritischen Bedingungen erreicht wurden, begann die Intensität der von der Einheit ausgesandten Neutronen rapid zu steigen. Es sei immerhin erwähnt, daß wenn der letzte Cadmiumstreifen so weit in der Einheit steckte, daß der effektive Multiplikationsfaktor gerade unter 1 lag, es ziemlich lange dauerte, bis die Intensität den Sättigungsgrad erreichte. Ähnlich stieg die Intensität, wenn der Cadmiumstreifen genügend weit herausgezogen war, um k_{eff} größer als 1 zu machen, gleichfalls nur langsam. Wenn beispielsweise ein Stab nur ein cm außerhalb der kritischen Position steht, beträgt die «Relaxationszeit», d. h. die Zeit bis zur Verdoppelung der Intensität, ungefähr 4 Stunden. Diese große

«Relaxationszeit» war das Resultat des kleinen Prozentsatzes verzögerter Neutronen, der in Anhang 3 besprochen wurde und der es verhältnismäßig leicht macht, die Einheit auf einem konstanten Intensitätsniveau zu halten.

Die Einheit wurde zum erstenmal am 2. Dezember 1942 bei einer maximalen Energieproduktion von ungefähr $^1/_2$ Watt in Betrieb gesetzt. Am 12. Dezember steigerte man die Intensität auf etwa 200 Watt, aber man hielt es nicht für ratsam, noch höher zu gehen, mit Rücksicht auf die Gefahr der Bestrahlung des Personals in dem Gebäude und in dessen Umkreis. Während dieses Betriebes mit hoher Intensität wurden Messungen über die Strahlungsintensität neben der Einheit, im Gebäude und bei dem Trottoir draußen durchgeführt.

ANHANG 5. EINE MUSTERLISTE VON BERICHTEN

Es folgt hier eine Liste von Titeln charakteristischer Berichte des Metallurgischen Laboratoriums der Universität von Chicago aus dem Jahre 1942.

Tabelle zur Berechnung des prozentualen Verlustes durch Vorhandensein von Unreinigkeiten in Legierungen.

Über die Radium-Beryllium-Neutronenquellen.

Vorläufige Schätzungen der Strahlungen von Spaltprodukten.

Untergrund natürlicher Neutronen in einer Multiplikationseinheit.

Absorptionsquerschnitte für schnelle Neutronen aus Berylliumbestrahlung mit Radiumemanation.

Mechanische Beanspruchungen durch Temperaturgradienten in Stäben und Kugeln.

Wirkung der geometrischen Anordnung auf die Neutronenresonanzabsorption von Uranium.

Strahlenschutz.

Versuchsplan über Flüssigkeitskühlung.

Bericht über die Möglichkeit der Uranreinigung durch Carbonyl-Bildung und Zerlegung.

Über die Radioaktivität von Kühlhelium.

Schätzung der Stabilität von Äther unter verschiedenen Bestrahlungsbedingungen.

Uranium-Vergiftung.

Radioaktivität der Transurane und der Spaltprodukte.

Chemische Wirkungen der Strahlung in der die Einheit umgebenden Luft.

Eine Schätzung der chemischen Strahlungseffekte auf das Kühlwasser der Einheit.

Methode der Extraktion und Reinigung von Uranyl-Nitrat.

Diffusion der Spaltprodukte von gegossenem Metall bei 600 °C. und 1000 °C.

ANHANG 6. BERICHT DES KRIEGSMINISTERIUMS ÜBER DIE NEU-MEXIKO-PROBE VOM 16. JULI 1945

„Der erfolgreiche Übertritt der Menschheit in ein neues Zeitalter, das Zeitalter des Atoms, wurde am 16. Juli 1945 vor den Augen einer gespannten Gruppe von namhaften Gelehrten und Militärs vollzogen, die in den Wüsten von Neu-Mexiko als Zeugen der ersten Schlußresultate ihres 2 Milliarden-Dollar-Aufwandes versammelt waren. Hier in einem entlegenen Abschnitt des Alamogordo-Luftstützpunktes, 120 Meilen (200 km) südöstlich von Albuquerque, wurde morgens 5.30 Uhr die erste Atomexplosion von Menschenhand herbeigeführt, die überragende Leistung der Kernphysik. Verfinsterter Himmel, starker Regenguß und Blitze unmittelbar bis 0 Uhr[1] steigerten die Dramatik des Erlebnisses.

„An einem Stahlturm befestigt, wurde eine revolutionäre Waffe, bestimmt, den Krieg, so wie wir ihn kennen, zu ändern oder aller Kriege Ende herbeizuführen, entladen mit einer Wucht, die den Eintritt der Menschheit in eine neue physikalische Welt ankündigte. Der Erfolg war größer, als die optimistischsten Schätzungen vermutet hatten. Eine kleine Menge Materie, Erzeugnis einer Kette von riesigen speziell hierfür errichteten Industriewerken, war hergestellt, um die Energie des Weltalls zu befreien, die im Atom seit Anfang der Zeiten eingeschlossen war. Eine fabelhafte Großtat war vollbracht. Theoretische Spekulation, kaum in Vorkriegslaboratorien angestellt, war in die Praxis projiziert.

„Diese Phase des Atombombenprojektes, welchem Generalmajor *Leslie R. Groves* vorsteht, wurde von Dr. *J. R. Oppenheimer,* dem theoretischen Physiker der Universität von California, geleitet. Ihm ist die Vollendung der Apparatur zur Atomenergie-Anwendung für militärische Zwecke zu verdanken.

„Die Spannung vor der eigentlichen Auslösung der Explosion

---

[1] Mit 0 Uhr ist der festgesetzte Augenblick für den Abschuß der Atombombe, nicht Mitternacht gemeint.

stieg auf einen furchtbaren Grad. Fehlschlagen war eine immer gegebene Möglichkeit. Auch ein zu großer Erfolg, wie ihn einige der Anwesenden ins Auge faßten, konnte eine unbeherrschbare (uncontrollable) und daher unbrauchbare Waffe bedeuten.

„Die Schlußmontage der Atombombe begann am 12. Juli nachts in einem alten »ranch house«. Während die verschiedenen Teilmontagestücke von entfernten Punkten ankamen, stieg die Spannung der Gelehrten auf einen immer höheren Grad. Der kühlste von allen war der Mann, der den Auftrag hatte, das Herzstück zu montieren, Dr. *R. F. Bacher,* in normalen Zeiten Professor an der Cornell-Universität.

„Die gesamten Kosten des Projektes — einschließlich den Bau ganzer Städte und völlig neuer, über viele Meilen des Landes zerstreuter Anlagen, dazu Versuche ohne Vergleich in der Vergangenheit — steckten in der Prüfungsbombe und ihren Teilen. Hier war der Brennpunkt des Wagnisses. Kein anderes Land der Erde war fähig gewesen zu solchem Aufwand an Gehirnarbeit und technischer Anstrengung.

„Die volle Bedeutung dieser abschließenden Momente vor der Enderprobung war diesen Männern der Wissenschaft klar. Sie erfaßten ihre Rolle als Pioniere in ein neues Zeitalter völlig. Sie wußten auch, daß *eine* falsche Bewegung sie und ihre ganze Arbeit für ewig vernichten würde. Bevor die Montage begann, unterzeichnete der Beauftragte von General *Groves,* der Brigadegeneral *Thomas F. Farrell,* einen Empfangsschein über die entscheidenden Gegenstände. Dies bedeutete die formelle Übergabe des unersetzlichen Materials von den Gelehrten an die Armee.

„Während der Vorbereitung der Schlußmontage entstanden einige schlimme Minuten, als die Montage eines wichtigen Teiles der Bombe sich verzögerte. Die ganze Einheit war Maschinenarbeit mit genauesten Maßen. Die Einfügung des Stückes war zum Teil geschehen, als es sich scheinbar dicht verkeilte und nicht weitergehen wollte. Dr. *Bacher* war gleichwohl nicht bestürzt und versicherte der Gruppe, daß die Zeit das Problem lösen werde. Nach drei Minuten bewahrheitete sich Dr. *Bachers* Feststellung, und die Montage wurde ohne weiteren Zwischenfall beendet.

„Spezialmannschaften (teams), gebildet aus Spitzenmännern der betreffenden wissenschaftlichen Gebiete, alle mit der ganzen

Sache verbunden, übernahmen ihre Spezialteile in der Montage. In jeder Gruppe waren Monate, sogar Jahre in einer Richtung geleiteter Mühe zentralisiert.

„Samstag, den 14. Juli, wurde das fertige Gebilde, von dem die Entscheidung über Erfolg und Mißerfolg des ganzen Projektes abhing, auf die Spitze des Stahlturmes gehoben. Den ganzen Tag und den folgenden ging die Vorbereitungsarbeit weiter. Außer dem zur Verursachung der Detonation notwendigen Apparat war ein komplettes Instrumentarium in den Turm eingebaut, um den »Pulsschlag« und alle Reaktionen der Bombe zu bestimmen.

„Das unheilvolle Wetter, das die Montage der Bombe verfolgt hatte, übte einen ernüchternden Einfluß auf die versammelten Experten aus, deren Werk inmitten von leuchtenden Blitzen und rollendem Donner vollbracht wurde. Das ungewöhnliche und störende Wetter schloß die Beobachtung des Versuches aus der Luft aus. Es verzögerte sogar die Auslösung der Explosion, die auf 4 Uhr morgens angesetzt war, um $1^1/_2$ Stunden. Seit mehreren Monaten waren Datum und Stunde annähernd festgesetzt; sie waren eines der wichtigsten Geheimnisse des bestgehüteten Geheimnisses des ganzen Krieges gewesen.

„Der nächste Beobachtungspunkt war 10 000 yards (9,14 km) südlich des Turmes, wo in einem Unterstand aus Holz und Erdreich die Versuchskontrollen untergebracht waren. An einem Punkt, der die beste Beobachtung zuließ, 17 000 yards (15,5 km) vom Turm entfernt, bezogen die Hauptpersonen des Atombomben-Projekts ihre Posten. Darunter waren General *Groves,* Dr. *Vannevar Bush,* Leiter des Amtes für wissenschaftliche Forschung und Entwicklung, und Dr. *James R. Conant,* der Präsident der Harvard-Universität.

„Die Auslösung der Detonation war Dr. *K. T. Bainbridge* vom Massachusetts Institute of Technology überantwortet. Er und Leutnant *Bush* im Auftrag der Military Policy Abteilung waren die letzten Männer, die den Turm mit seiner kosmischen Bombe inspizierten.

„Um 3 Uhr morgens bewegte sich die Gruppe zur Kontrollstation. General *Groves* und Dr. *Oppenheimer* berieten mit den Meteorologen. Die Entscheidung wurde getroffen, mit dem Ex-

periment vorwärts zu schreiten, ungeachtet der Unsicherheit des Wetters. Die Zeit wurde auf 5.30 Uhr morgens angesetzt.

„General *Groves* traf wieder mit Dr. *Conant* und Dr. *Bush* zusammen, und kurz vor dem Zeitpunkt der Explosion vereinigten sie sich mit den zahlreichen Wissenschaftlern, die im Hauptlager (Base Camp) versammelt waren. Hier wurde allen Anwesenden befohlen, sich auf den Boden zu legen, Gesicht nach unten, Köpfe abgewandt von der Richtung des Explosionsstoßes.

„Die Spannung erreichte im Kommandoraum (control room) einen furchtbaren Grad, als sich die »Todeslinie« (deadline) näherte. Die verschiedenen Beobachtungspunkte im Gelände waren mit dem Kommandoraum durch Radio verbunden, und 20 Minuten vor Abschuß übernahm Dr. *S. K. Allison* von der Chicago-Universität das Radio und machte periodische Zeitangaben.

„Die Zeitsignale: »noch 20 Minuten«, »noch 15 Minuten« usf. erhöhten die Spannung zum Zerspringen, so daß die Gruppe im Kommandoraum, die Dr. *Oppenheim* und General *Farrell* einschloß, den Atem anhielt, alle betend mit der Intensität des Augenblickes, der immer in jedem Anwesenden lebendig bleiben wird. Bei dem Signal: »noch 45 Sekunden« setzte der Robot-Mechanismus[1] ein, und von diesem Augenblick an wirkte die ganze große Menge komplizierter, raffinierter Mechanismen ohne menschliche Lenkung. An einem Reserveschalter war immerhin ein der Armee angehöriger Wissenschaftler aufgestellt, bereit, zu versuchen, die Explosion zu stoppen, wenn die Order ausgegeben würde. Aber diese Order kam nie.

„Zur festgesetzten Zeit erschien ein blendender Lichtblitz, der das ganze Gelände heller als das hellste Tageslicht erleuchtete. Eine Gebirgskette 3 Meilen vom Beobachtungspunkt entfernt trat in kühnem Relief hervor. Dann kam ein erschütterndes, andauerndes Krachen und eine schwere Druckwelle, die zwei Männer außerhalb des Kommandoraumes niederwarf. Unmittelbar hiernach kochte eine riesenhafte, vielfarbige wogende Wolke empor bis zu einer Höhe von über 40 000 Fuß (12 184 m). Wolken auf ihrem Weg verschwanden. Bald zerstreuten wechselnde substratosphärische Winde die nunmehr graue Masse.

---

[1] d. i. automatisch wirkender Mechanismus.

„Der Versuch war vorbei, das Unternehmen erfolgreich.

„Der Stahlturm war gänzlich verdampft. Wo er gestanden hatte, war ein riesiger abschüssiger Krater. Betäubt, aber auch erleichtert durch den Erfolg ihres Experimentes, sammelten die Wissenschaftler ihre Kräfte, um die Stärke der neuen Waffe Amerikas abzuschätzen. Um die Art des Kraters zu untersuchen, wurden Tanks mit Spezialausrüstung in das Gelände gerollt; auf einem von ihnen fuhr Dr. *Enrico Fermi,* der berühmte Kernphysiker. Die Antwort auf ihre Entdeckungen besteht in der heute in Japan bei der ersten militärischen Anwendung der Atombombe herbeigeführten Zerstörung.

„Wäre die Gegend, wo der Versuch gemacht wurde, nicht so einsam gewesen und hätte die Presse des Gebietes sich nicht zur Geheimhaltung verpflichtet, so würde der Versuch sicherlich eine weitreichende Beachtung auf sich gelenkt haben. Auch so diskutieren noch heute viele Leute in dieser Zone über die Bedeutung dieses Krachens. Bezeichnend ist, nach Presseberichten, das Erlebnis eines blinden Mädchens in der Nähe von Albuquerque, viele Meilen von der Szene entfernt, das, als der Blitz des Experimentes den Himmel erhellte, bevor noch die Explosion zu hören war, ausrief: »was war das?«

„Interviews mit General *Groves* und General *Farrell* liefern die folgenden Augenzeugenberichte über den Versuch. General *Groves* sagte: »Meine Eindrücke von den Höhepunkten dieser Nacht waren die folgenden: Nach ungefähr einer Stunde Schlaf stand ich um 1 Uhr auf und blieb von da an bis gegen 5 Uhr dauernd mit Dr. *Oppenheimer* zusammen. Er war natürlich gespannt, obwohl sein Geist mit der gewohnten außerordentlichen Leistungsfähigkeit arbeitete. Ich versuchte, ihn vor der offenbaren Sorge vieler seiner Assistenten zu schützen, die durch das unsichere Wetter beunruhigt waren. Um 3.30 Uhr entschieden wir, daß wir wahrscheinlich um 5.30 Uhr »feuern« könnten. Um 4 Uhr hatte der Regen aufgehört, aber der Himmel war mit schweren Wolken bedeckt. Mit fortschreitender Zeit wurde unser Entschluß fester.

„ »Während des größten Teils dieser Stunden wanderten wir beide vom Kommandohaus in die Dunkelheit, um nach den Sternen zu sehen und uns gegenseitig zu versichern, daß der eine

oder die zwei sichtbaren Sterne heller geworden seien. 5.10 Uhr verließ ich Dr. *Oppenheimer* und kehrte zum Hauptbeobachtungspunkt zurück, der 17 000 yards (15,5 km) vom Explosionsort entfernt war. In Übereinstimmung mit unseren Befehlen fand ich das ganze Personal, soweit es nicht anderweits beschäftigt war, auf einem erhöhten Fleck versammelt.

„ »2 Minuten vor dem bezeichneten Augenblick lagen alle Personen Gesicht nach unten, Füße zum Explosionsort. Als die restliche Zeit von den Lautsprechern der 10 000 yards Kommandostation angesagt wurde, herrschte völliges gebanntes Stillschweigen. Dr. *Conant* sagte, er habe sich nicht vorstellen können, daß Sekunden so lang sein könnten. Die meisten Personen schützten befehlsgemäß irgendwie ihre Augen.

„ »Zuerst kam der Lichtausbruch (burst of light) von einer Brillanz über jeden Vergleich. Wir wälzten uns alle herum und schauten durch geschwärzte Gläser auf den Feuerball. Etwa 40 Sekunden später kam die Stoßwelle, gefolgt vom Schall, die aber beide nach unserer vollständigen Überraschung über den außergewöhnlichen Lichteffekt nichts Erschreckendes mehr zu haben schienen.

„ »Eine massive Wolke bildete sich, die aufstieg und mit furchtbarer Gewalt aufwärtswogte und in ungefähr 5 Minuten die Substratosphäre erreichte.

„ »Zwei zusätzliche Explosionen geringeren Effekts und anders als der Blitz ereigneten sich in der Wolke kurz nach der Hauptexplosion.

„ »Die Wolke stieg in große Höhe empor, zuerst in der Form einer Kugel, dann eines Pilzes, darauf ging sie in eine lange schornsteinförmige schleppende Säule über und wurde schließlich durch die wechselnden Windrichtungen in den unterschiedlichen Höhen nach verschiedenen Richtungen zerstreut.

„ »Dr. *Conant* kam herüber, und wir reichten uns die Hände in gegenseitiger Gratulation. Dr. *Bush,* auf meiner anderen Seite, tat das gleiche. Das Gefühl aller, selbst der Nicht-Eingeweihten, war das einer tiefen Ehrfurcht. Dr. *Conant,* Dr. *Bush* und ich selbst waren gepackt von dem noch stärkeren Gefühl, daß die Zuversicht derer, die für Einleitung und Durchführung des her-

kulischen Projekts verantwortlich gewesen waren, gerechtfertigt worden sei.«

„General Farrells Eindrücke sind die folgenden: »Die Szene innerhalb des Unterstandes war dramatisch über alle Worte. In und um den Unterstand waren etwa 20 Leute mit den allerletzten Vorbereitungen beschäftigt. Unter ihnen war Dr. Oppenheimer, der als Direktor die große wissenschaftliche Verantwortung getragen hatte, die neue Waffe aus den in Tennessee und Washington hergestellten Rohmaterialien zu entwickeln. Er war umgeben von einem Dutzend seiner Schlüsselassistenten wie Dr. Kistiakowsky und Dr. Bainbridge, die alle einzelnen Vorbereitungen für den bevorstehenden Versuch überwachten. Unter der Gruppe befand sich auch der Wetterexperte und einige andere. Außer ihnen war da noch eine Anzahl Soldaten, zwei oder drei Offiziere der Armee und einer von der Marine. Der Unterstand war mit einer großen Zahl mannigfaltiger Instrumente und Radioapparate angefüllt.

„»Während der beiden etwas fieberhaften Stunden, die der Explosion vorangingen, befand sich General Groves bei dem Direktor. 20 Minuten vor dem festgesetzten Augenblick verließ General Groves den Unterstand und begab sich auf seine Station im Hauptlager, in erster Linie weil sie ein besserer Beobachtungsposten war und ferner auf Grund unserer Regel, daß in Augenblicken der Gefahr, die an beiden Punkten gegeben war, er und ich nicht beisammen sein sollten.

„»Gleich nach General Groves' Weggang begannen die Lautsprecherankündigungen der Zeitintervalle bis zum Auslösen der Explosion, die an die anderen Gruppen der Teilnehmer und Beobachter gesendet wurden. Als die angesagten Zeitintervalle immer kleiner wurden und von Minuten auf Sekunden heruntergingen, stieg die Spannung sprunghaft. Jeder in dem Raum wußte um die furchtbaren Möglichkeiten, die dem Ding innewohnten, das sich nun ereignen sollte. Die Gelehrten hatten das Gefühl, daß ihre Berechnungen stimmen müßten und daß die Bombe losgehen müßte. Aber jedermann hegte noch ein großes Maß von Zweifel.

„»Wir erreichten das Unbekannte und wir wußten nicht, was daraus entstehen würde. Es kann mit Sicherheit gesagt werden,

daß die meisten der Anwesenden beteten — und zwar heißer beteten, als sie je zuvor gebetet hatten. Wenn der Schuß erfolgreich war, so bedeutete das die Rechtfertigung für mehrere Jahre heißer Anstrengung von Zehntausenden von Menschen — von Staatsmännern, Gelehrten, Ingenieuren, Arbeitern, Soldaten und von vielen anderen Leuten aller möglichen Berufe.

„»In jenem kurzen Augenblick kam in der Wüste von Neu-Mexiko die unerhörte Anstrengung der Gehirne und Muskeln aller dieser Leute plötzlich und aufwühlend zu vollstem Gelingen. Dr. Oppenheimer, auf dem eine wahrhaft schwere Last geruht hatte, wurde von einer wachsenden Spannung überfallen, als die letzten Sekunden abliefen. Er atmete kaum mehr. Er hielt sich an einem Pfosten aufrecht. In den letzten Sekunden starrte er geradeaus vor sich, und dann, als der Ansager rief: jetzt! und sich diese furchtbare Lichterscheinung, von einem grollenden Donner der Explosion gefolgt, zeigte, entspannten sich seine Züge in den Ausdruck ungemeiner Erleichterung. Mehrere Beobachter, welche hinter dem Unterstand waren, um die Leuchteffekte zu verfolgen, wurden von der Druckwelle zu Boden geworfen.

„»Die Spannung im Raume wich, und jeder gratulierte dem anderen. Jeder fühlte: es ist gelungen! Was nun auch immer geschehen mochte: alle wußten, das schier unmögliche wissenschaftliche Unternehmen war geglückt. Nicht länger würde die Atomspaltung in den geheimen Gängen der Träume der theoretischen Physiker verborgen bleiben. Schon bei ihrer Geburt war sie nahezu zu voller Größe erwachsen. Es war eine gewaltige neue Kraft, die zum Guten oder zum Bösen gebraucht werden konnte. Alle in dem Unterstand fühlten, daß sie, die bei der Geburt dieser Macht beteiligt waren, ihr Leben der Mission weihen müßten, daß diese Entdeckung nur zum Guten und nie zum Bösen gebraucht werde.

„»Dr. Kistiakowsky legte seine Arme um Oppenheimer und drückte ihn an sich unter Freudenrufen. Andere waren ebenso begeistert. Alle aufgespeicherte Erregung wurde in diesen wenigen Minuten befreit, und alle schienen unmittelbar zu fühlen, daß die Explosion die optimistischsten Erwartungen, die wildesten Hoffnungen der Wissenschaftler weit übertroffen habe, daß sie an der Geburt eines neuen Zeitalters teilgenommen hätten —

dem Zeitalter der Atomenergie. Und alle fühlten die tiefe Verantwortung, mitzuwirken, daß die gewaltigen Kräfte, die nun zum erstenmal in der Geschichte aus ihren Fesseln befreit worden waren, in rechte Bahnen geleitet würden.

„»Was den gegenwärtigen Krieg anlangt, so spürte man, daß, was auch immer geschehen möge, wir nun im Besitz eines Mittels waren, den Krieg rasch zu beenden und Tausende von amerikanischen Menschenleben zu erhalten. Und was die Zukunft betraf, so war in das Dasein etwas Großes und Neues eingetreten, das sich als unvergleichlich wichtiger erweisen würde als selbst die Entdeckung der Elektrizität oder irgendeine der anderen großen Entdeckungen, die unser Dasein so sehr verändert haben.

„»Ja, man darf wohl die Auswirkungen als noch nie dagewesen, als großartig, als wunderbar, staunenerweckend und schrecklich bezeichnen. Nie hatte Menschenhand ein solch gewaltiges Kraftphänomen je vorher zur Verfügung gehabt. Die Lichteffekte spotteten der Beschreibung. Das ganze Land war erhellt von einem versengenden Licht, dessen Stärke viele Male größer war als die der Mittagssonne. Es leuchtete in goldenen, purpurnen, violetten, grauen und blauen Farben. Es erhellte jeden Gipfel, jede Spalte und jeden Felsgrat der nahegelegenen Gebirgskette mit einer Klarheit und Schönheit, die man nicht beschreiben kann, die man gesehen haben muß, um sie sich vorzustellen. Es war von jener Schönheit, von der die Dichter träumen, die sie aber nur armselig, unzulänglich beschreiben können. 30 Sekunden später kam zuerst die Explosion, der Luftdruck prallte hart gegen die Leute und Dinge, und dann folgte fast unmittelbar ein lautes, anhaltendes, schauerliches Donnern wie eine Warnung vor dem Jüngsten Tag, das uns spüren ließ, daß wir winzige Wesen in blasphemischer Weise wagten, an die Kräfte zu rühren, die bis dahin dem Allmächtigen vorbehalten waren. Worte reichen nicht aus, um denen, die nicht dabei waren, den Eindruck wiederzugeben, den wir körperlich, geistig und seelisch erfuhren. Man muß Zeuge gewesen sein, um es sich vorzustellen.«"

ANHANG 7. BERICHT DES BRITISCHEN INFORMATIONSDIENSTES «BRITANNIEN UND DIE ATOMBOMBE» VOM 12. AUGUST 1945.

EINFÜHRUNG

Der Premierminister hat einen Bericht herausgegeben, in dem die Ereignisse beschrieben sind, die in den Vereinigten Staaten zur Erzeugung von Atombomben führten und zum Abwurf der ersten von diesen auf Japan durch die Luftwaffe der Vereinigten Staaten.

Ebenso haben Präsident Truman und Mr. Howe, der kanadische Minister für Munition und Armeelieferungen Berichte erstattet. Weitere Berichte wurden von den Regierungen der Vereinigten Staaten und Kanada herausgegeben, die Rechenschaft über jene Arbeiten in ihren Ländern geben, die zu dieser bemerkenswerten Errungenschaft führten oder damit verknüpft waren. Diese zusätzlichen Berichte geben auch eine Übersicht über die wissenschaftlichen Grundlagen, ohne die es unmöglich ist, den erreichten großen Fortschritt zu würdigen.

Der folgende offizielle Bericht ist vorbereitet worden, um der Regierung des Vereinigten Königreiches zu einem ähnlichen Zweck zu dienen.

Der Bericht beginnt mit einer sehr kurzen Schilderung der hervorragendsten Entdeckungen in dem als Kernphysik bekannten Zweig der Physik, die im Jahre 1939 die Wissenschaftler zu dem Glauben an die Möglichkeit geführt hatten, einen Weg zu finden, um Atomenergie im großen Maßstab und unter kontrollierten Bedingungen freizusetzen.

Wie man sehen wird, haben Wissenschaftler aus vielen Ländern zu dieser Entwicklung beigetragen, und der Anteil der britischen Laboratorien war hervorragend.

Dann folgt ein Bericht über die Prüfung des Problems in diesem Lande von Anfang 1940 bis Mitte 1941, als ein wissenschaftliches Komitee berichtete, es sei eine gute Chance dafür vor-

handen, Atombomben noch rechtzeitig für den Gebrauch in diesem Krieg herzustellen.

Der nächste Abschnitt des Berichts handelt von der Organisation der Arbeit im Vereinigten Königreich und vom Ziel des unternommenen Forschungsprogramms.

Der Meinungsaustausch mit der entsprechenden Organisation in den Vereinigten Staaten wird erwähnt und die Entscheidung, die bereits der Bericht des Premierministers erwähnte, nämlich, daß Anlagen zur Großerzeugung von Atombomben nicht im Vereinigten Königreich, sondern in den Vereinigten Staaten gebaut werden sollten.

Die Entscheidung, einen Teil der Arbeit Kanada zu übertragen, wird kurz erwähnt. Es war dies zunächst ein gemeinsames englisch-kanadisches Projekt, wurde aber später, zufolge der Mitarbeit der amerikanischen Regierung, ein Unternehmen von drei Partnern.

Im Bericht des Premierministers wird erwähnt, daß, auf Grund von Besprechungen zwischen Präsident Roosevelt und Mr. Churchill, in Washington ein Vereinigtes Planungs-Komitee (Combined Policy Committee) eingesetzt wurde.

Dieses Komitee akzeptierte gewisse Vorschläge seiner wissenschaftlichen Berater für eine bessere gegenseitige Ergänzung der wissenschaftlichen Arbeit, was die Übersiedlung vieler Wissenschaftler, die im Vereinigten Königreich an diesem Projekt arbeiteten, nach den Vereinigten Staaten und Kanada zur Folge hatte.

Der vorliegende Bericht endet mit einer Bemerkung über die Auswirkungen dieser Maßnahme auf die britischen Programme.

Dieser Bericht soll im Zusammenhang mit den amerikanischen und kanadischen Berichten gelesen werden. Er beschränkt sich daher so weit wie möglich auf die Arbeit im Vereinigten Königreich und auf den Anteil, den britische Wissenschaftler an den amerikanischen und kanadischen Projekten hatten.

Infolgedessen findet das gigantische Ausmaß der amerikanischen wissenschaftlichen und technischen Anstrengungen keine Erwähnung, deren erfolgreiches Ergebnis, wie der Premierminister schon sagte, einer der größten Triumphe des menschlichen Geistes ist, soweit das geschichtliche Gedächtnis reicht.

HISTORISCHER ÜBERBLICK

Die Entdeckung der Uranspaltung und ihre Anwendung in der Atombombe ist kein isoliertes Ereignis, sondern folgt aus einer Reihe von Entdeckungen, die seit Ende des letzten Jahrhunderts die Grundlagen der modernen Physik bilden. Diese Arbeit wurde in vielen Ländern geleistet und ist das Ergebnis einer offenen und freien Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, von denen die, welche in England arbeiteten, eine sehr bedeutende Rolle gespielt haben.

Die klassischen Ideen über Natur und Eigenschaften der Materie gipfelten in der Atomtheorie des 19. Jahrhunderts. Man nahm an, daß alle Materie aus separaten, unzerstörbaren Teilchen oder Atomen bestehe, die in 92 verschiedene Arten oder Elemente eingeteilt wurden. Aus den Atomen eines oder mehrerer dieser Elemente sind all die verschiedenen chemischen Verbindungen aufgebaut, die in der Natur vorkommen. Aber man betrachtete es als Axiom, daß die Atome eines beliebigen Elements auf keine Weise in die eines anderen verwandelt oder übergeführt werden könnten.

Radioaktivität

Der grundlegende Einbruch in diese Theorie erfolgte, als der französische Physiker *H. Becquerel* im Jahre 1896 entdeckte, daß ein Element — Uran — ständig eine Strahlung unbekannter Art aussandte, die Materie durchdringen und eine photographische Platte angreifen konnte. Die weitere Untersuchung dieser neugefundenen Eigenschaft des Urans führte 1898 zur Isolierung eines anderen Elements — Radium — aus den Uranerzablagerungen in Joachimsthal durch *Pierre und Marie Curie.* Radium zeigte diese gleiche Eigenschaft, Strahlung auszusenden, in viel höherem Grade, und es war klar, daß das Phänomen der «Radioaktivität», wie man es nannte, vollkommen verschieden von den Phänomenen war, die normale chemische Reaktionen zwischen Atomen begleiten. 1902 äußerten *Rutherford* und *Soddy,* die damals an der McGill-Universität in Montreal (Kanada) arbeiteten, die Vermutung, daß eine Erklärung dieser Tatsache einzig durch die Annahme gegeben werden könne, daß die Atome des Urans,

Radiums und anderer radioaktiver Elemente, die man inzwischen entdeckt hatte, unstabil seien und ständig mit Geschwindigkeiten, die für jedes Element charakteristisch seien, abgebaut würden.

Diese Vermutung wurde überzeugend bewiesen durch detaillierte experimentelle Arbeit, in deren Verlauf die Natur und Eigenschaften der Strahlung radioaktiver Elemente entdeckt wurden. Ein Teil dieser Strahlung, die sog. α-Strahlen, besteht aus Heliumatomen, welche eine positive elektrische Ladung tragen, und diese erwiesen sich als äußerst wertvolles Mittel für die weitere Erforschung der Atomstruktur.

In der Tat war es die Erforschung der Durchdringung der Materie durch α-Strahlen, die 1911 *Rutherford* an der Universität Manchester zu der grundlegenden Entdeckung führte, daß die gesamte Masse jedes Atoms in einem winzigen zentralen Kern konzentriert sei, der eine positive Ladung trägt. Um diesen Kern, aber in relativ sehr großen Entfernungen, drehen sich negativelektrische Elementarladungen — die Elektronen — in ausreichender Anzahl, um die positive Ladung des Kerns genau zu neutralisieren. Die Masse dieser Elektronen kann im Vergleich zu der des Kerns vernachlässigt werden. Aber nach den Begriffen der klassischen elektromagnetischen Theorie würde ein solches System unstabil sein, und die Energie der rotierenden Elektronen würde in sehr kurzer Zeit als Strahlung verloren gehen. *Niels Bohr* in Kopenhagen brachte 1913 eine Theorie vor, die Rutherfords Modell des «Kernatoms» mit der Quantentheorie der Energie verband, welche von *Planck* ausgesprochen worden war, um Unzulänglichkeiten der klassischen elektromagnetischen Theorie zu erklären.

Das daraus hervorgegangene Bohr-Rutherfordsche Atommodell erwies sich von größtem Wert, um die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen in jedem Zweig der Physik zu erklären, insbesondere die Beziehungen zwischen den verschiedenen Elementen in Hinsicht auf ihre gewöhnlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften. Diese werden vollständig durch die Elektronen bestimmt, die um den Kern rotieren, und sind daher von der Kernmasse praktisch unabhängig. Es war daher ohne weiteres verständlich, daß jedes beliebige Element in mehr als einer Modifikation mit verschiedenen Atommassen, aber fast

identischen physikalischen und chemischen Eigenschaften auftreten konnte.

Die Existenz solcher Modifikationen eines Elements, als «Isotope» bekannt, war zuerst von *Soddy* im Jahre 1910 vermutet worden als Ergebnis von Studien über die Abbauprodukte der natürlichen radioaktiven Elemente.

Aston in Cambridge führte eine Arbeit, die von *J. J. Thomson* begonnen worden war, weiter und entwickelte den sog. «Massenspektrographen», der einen Strom elektrisch geladener Atome — oder Ionen — einem gekreuzten elektrischen und magnetischen Feld unterwarf und diejenigen verschiedener Massen an verschiedenen Stellen konzentrierte. Mit Hilfe dieses Instruments wurde bewiesen, daß die große Mehrzahl der Elemente aus einer Mischung von zwei oder mehreren Isotopen besteht und daß das betreffende Atomgewicht jedes gegebenen Isotops eines beliebigen Elements nahezu ein einfaches Vielfaches des Gewichts des Wasserstoffkerns oder Protons ist.

Weil die Isotope eines Elements beinahe identische chemische Eigenschaften haben, ist es im allgemeinen außerordentlich schwierig, sie zu trennen oder auch nur ihre relative Konzentration beträchtlich zu ändern. Wir müssen Prozesse zu Hilfe nehmen, die von der Kernmasse des Atoms abhängen, d. h. den Massenunterschied zwischen den Isotopen ausnutzen. Dieser Unterschied ist gewöhnlich nur ein kleiner Bruchteil der Gesamtmasse. Dazu kommt, daß einige dieser Methoden, wie z. B. die im Massenspektrographen gebrauchte, zwar nicht schwierig anzuwenden sind, aber gewöhnlich nur sehr kleine Materialmengen verarbeiten können, zu wenig, um von großem praktischem Nutzen zu sein.

1932 zeigten *Urey* und *Brickwedde* von der Columbia-Universität in New York, daß der Wasserstoff selbst kein einheitliches Element ist, sondern eine kleine Menge (ungefähr $^1/_{5000}$) eines Isotops enthält, das als «schwerer Wasserstoff» oder Deuterium bekannt wurde und beinahe die doppelte Masse eines Protons hat. Da in diesem Fall das Massenverhältnis der Isotope 2 : 1 ist, sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasserstoff und Deuterium merklich verschieden, und man fand die

Möglichkeit, sie in großen Mengen durch normale technische Methoden voneinander zu trennen.

Die Atome beinahe aller Elemente sind stabil, und nur ein paar schwere Elemente sind radioaktiv und zerfallen spontan. Es war eine der mehr in die Augen springenden Tatsachen der Radioaktivität, daß beim Zerfall Energie freigesetzt wird. Der Energiebetrag, der von einem einzigen Ereignis freigesetzt wird, d. h. beim Zerfall eines einzigen radioaktiven Kerns, ist unvergleichlich viel größer als der Energiebetrag, den man in einem einzigen Ereignis bei einer chemischen Reaktion erhält, sagen wir, beim Verbrennen eines Kohlenstoffatoms. Andererseits ist der Energiebetrag, der aus radioaktiven Elementen erhalten werden kann, von keinem praktischen Wert, weil die Zahl der zerfallenden Atome klein ist, nur ein winziger Bruchteil der vorhandenen Atome, und weil die Zerfallsgeschwindigkeit in keiner Weise beeinflußt werden kann. Das Phänomen der Radioaktivität deutet also an, daß die Atomkerne eine ungeheure Energiereserve enthalten, gab aber keinen Schlüssel zu Methoden, um ihre Freisetzung zu beeinflussen. Offenbar hing jede Hoffnung, die Bedingungen zu verstehen, unter denen die Energie freigesetzt werden könnte, vom Verständnis des Aufbaus des Atomkerns ab.

Künstlicher Atomzerfall

Der erste entscheidende Schritt zur Lösung dieses Problems wurde von *Rutherford* gemacht, der 1919 experimentell zeigte, daß die geladenen α-Teilchen des Radium-C in seltenen Fällen mit dem Atomkern des gewöhnlichen Elements Stickstoff in solcher Weise zusammenstoßen konnten, daß er auseinanderbrach und dabei einen Kern eines Sauerstoffatoms und einen Wasserstoffkern oder Proton bildete.

Während die Entdeckung der Radioaktivität gezeigt hatte, daß einige Elemente spontan auseinanderbrechen, um andere Elemente zu bilden, hatte nun Rutherford gezeigt, daß die Teilchen, die bei diesem Prozeß ausgesandt werden, gebraucht werden konnten, um die Atome anderer Elemente, die normalerweise stabil waren, auseinanderzubrechen oder umzuwandeln.

Diese Entwicklung wurde in den folgenden Jahren von *Ru-*

therford und *Chadwick* weiter verfolgt, und sie fanden heraus, daß viele andere leichte Elemente in ähnlicher Weise umgewandelt werden konnten. In jedem Fall wurde ein Proton ausgestoßen, und im allgemeinen war der Umwandlungsprozeß von der Freisetzung einer beträchtlichen Energiemenge begleitet. So fand man heraus, daß das Proton ein normaler Bestandteil des Atomkerns und einer der grundlegenden Bausteine der Materie ist. Ferner war die Freisetzung von Energie bei diesen Prozessen ein weiterer Nachweis des Energievorrats im Atomkern.

Parallel mit dieser Entwicklung griff Rutherford mit Chadwick und andern Kollegen und ihren Schülern am Cavendish-Laboratorium viele andere Fragen an, die die Eigenschaften der Atomkerne und ihre Struktur betrafen, und legten damit die experimentellen Grundlagen zu einem ganzen neuen Zweig der Physik, der nun als Kernphysik bekannt ist und der aus Rutherfords Entdeckungen entstand, erstens aus der Natur des Phänomens der natürlichen Radioaktivität, zweitens aus der Existenz des Atomkerns und drittens daraus, daß einige Kerne durch Beschießung mit α-Teilchen umgewandelt werden können.

Ein weiterer sehr wichtiger Schritt erfolgte im Vereinigten Königreich im Jahre 1932, als *Cockcroft* und *Walton* einen Versuch ausführten, bei dem Wasserstoffkerne, die in einer elektrischen Entladung künstlich erzeugt und durch eine angelegte Spannung auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt worden waren, verwendet wurden, um ein anderes stabiles Element, Lithium, zu beschießen. Man fand, daß die Atome dieses Elements zerfallen, und die Umwandlung der Materie, der Traum der Alchimisten, war in einem vollkommen kontrollierten Laboratoriumsversuch vollbracht worden.

Bei dieser Umwandlung und anderen, die dieser neuen Entdeckung folgten, war die Freisetzung von Energie enorm für solch ein winziges Ereignis, wie eine einzige Kernreaktion es ist. Immerhin war die Zahl der Kernreaktionen so klein, daß der durch die Reaktion erzeugte Energiebetrag außerordentlich gering war im Vergleich zur gesamten, für die Erzeugung der beschießenden Teilchen aufgewendeten Energie. Der praktische Wert dieser Kernreaktionen als Energiequelle war immer noch vollkommen unerheblich.

Der Grund liegt nicht fern: die Kernreaktionen sind nicht nur sehr seltene Ereignisse, sondern die Reaktionen pflanzen sich auch nicht von selber fort. Das ist ganz anders als bei den chemischen Reaktionen, mit denen wir in unsern täglichen Leben vertraut sind, wie bei der Verbrennung von Kohle oder Öl. Wenn diese Reaktionen einmal begonnen haben, so pflanzen sie sich von selbst fort und entwickeln sich und breiten sich aus und erfassen das ganze Material; so setzt das Anzünden eines Feuers genügend Wärme frei, um den benachbarten Brennstoff zu entzünden, der seinerseits wieder mehr Wärme freisetzt, um noch mehr Brennstoff in Brand zu setzen. Das ist bei den Kernreaktionen, die bis jetzt erwähnt wurden, nicht der Fall; die in ihnen gebildeten Teilchen genügen nicht, um auf Nachbarkerne so einzuwirken, daß die Reaktion aufrechterhalten bleibt und sich ausbreiten kann. Es ist klar, wenn wir die in den Atomkernen versteckten Energievorräte anzapfen und sie praktisch verwerten wollen, müssen wir eine Reaktion finden, die sich selbst ausbreitet; z. B. eine Reaktion, bei der Teilchen von der gleichen Art ausgesandt werden, die die Reaktion einleiteten, und in genügender Zahl, um auf benachbarte Kerne einzuwirken, die dann ihrerseits neue Teilchen aussenden, welche wieder mit andern Kernen reagieren, so daß eine Kettenreaktion entsteht, die sich durch die ganze Masse ausbreitet.

Es erscheint angezeigt, hier die Form dieser Energiereserve im Atomkern zu betrachten. Schon 1905 zeigte *Einstein*, daß nach der Relativitätstheorie kein wesentlicher Unterschied zwischen Masse und Energie besteht, sondern daß Energie Masse hat und Masse Energie darstellt. Viele Jahre lang konnte der Beweis, daß Energie und Masse äquivalent sind, nur indirekt, wenn auch schlüssig, geführt werden. Der Grund für dieses Fehlen eines direkten Beweises ist die extreme Größe des Verhältnisses von Masse und Energie. Eine sehr kleine Masse entspricht einem sehr großen Energiebetrag. Z. B. würde die Masse einer Unze[1], wenn sie vollständig in Energie verwandelt würde, ausreichen, um beinahe eine Million Tonnen Wasser in Dampf zu verwandeln. Die phantastische Größe der Umwandlungszahl von Masse in Energie erklärt, warum bei gewöhnlichen chemischen Prozes-

[1] 1 ounce (Unze) = 28,34 gr.

sen niemals ein Massenverlust beobachtet wurde; die bei der Verbrennung abgegebene Wärme ist, wie wir glauben, mit Masse verbunden, aber ihr Betrag ist so klein, daß er auch mit der empfindlichsten Waage nicht festgestellt werden kann.

Ein sehr schlagender und direkter Beweis für die Äquivalenz von Masse und Energie wurde durch die Versuche der künstlichen Atomumwandlung geliefert. Es zeigte sich, daß bei diesen Kernreaktionen eine Energiefreisetzung immer von einer Abnahme der Masse begleitet und daß die Äquivalenz von Masse und Energie genau die von Einstein vorausgesagte ist. Daraus geht hervor, daß bei diesen Kernreaktionen Materie teilweise in Energie verwandelt wird und daß die Energiereserve des Atomkerns an der am meisten in die Augen springenden Stelle versteckt ist, nämlich in seiner eigenen Masse. In der Materie ist daher ein Energievorrat enthalten, der ungeheuer viel größer ist als derjenige, den wir aus irgendeinem bekannten chemischen Prozeß erhalten können. Da keine solchen ungeheuren Energiequellen auf dieser Erde bekannt sind, ist es klar, daß keine beträchtliche Umwandlung von Materie in Energie hier vorkommt. Andererseits nimmt man nun allgemein an, daß es dieser Energievorrat in der Materie selbst ist, der die Wärme der Sonne und anderer Sterne durch einen Zyklus von Kernreaktionen aufrechterhält, in denen Materie in Energie verwandelt wird.

Entdeckung des Neutrons

1932 machte *Chadwick* im Cavendish-Laboratorium eine Entdeckung von grundlegender Bedeutung. Einige Jahre früher hatten *Bothe* und *Becker* in Deutschland die Beobachtung gemacht, daß das Element Beryllium, wenn es mit aus Polonium stammenden α-Strahlen beschossen wird, eine sehr durchdringende Strahlung aussendet. *Joliot* und seine Frau *Irène Curie-Joliot* in Paris fanden, daß diese Strahlung einige ganz außerordentlichen Eigenschaften zeigte. Auf Grund eines genauen Studiums dieser Eigenschaften und durch eingehende Messungen konnte Chadwick nachweisen, daß diese Strahlung aus Elementarteilchen besteht, die ungefähr die gleiche Masse wie ein Proton, aber keine elektrische Ladung haben. Diese neugefundenen Teilchen wurden «Neutronen» genannt, und man erkannte sofort, daß sie zusam-

men mit den Protonen, wahrscheinlich die letzten Bestandteile der Atomkerne aller Elemente seien. Der Kern jedes beliebigen Elementes konnte so aufgebaut werden aus der benötigten Zahl von Protonen, um die beobachtete positive Ladung zu erhalten, und einer zusätzlichen Zahl von Neutronen, um die Kernmasse auf den beobachteten Wert zu bringen.

Die noch größere praktische Bedeutung der Entdeckung des Neutrons bestand aber darin, daß es durch seinen ungeladenen Zustand ein ideales Geschoß darstellt, um Kernumwandlungen herbeizuführen.

Alle physikalischen Laboratorien der ganzen Welt begannen energisch, das Neutron als Mittel zur Erforschung der Kernstrukturen und -reaktionen zu gebrauchen. Man konnte Neutronenquellen herstellen, indem man entweder Radium oder Polonium mit Beryllium mischte, wobei man die schon erwähnte Kernreaktion benutzt, oder mit Hilfe eines «Cyclotron» genannten Instruments, das von *E. O. Lawrence* an der Universität von Californien in Berkeley entwickelt worden war. Dieses Instrument war von großem Wert zur Erzeugung von geladenen Atomstrahlen hoher Energie, und bei vielen Kernreaktionen, die mit solchen Strahlen ausgeführt werden konnten, zeigte es sich, daß Neutronen hervorgebracht werden.

Inzwischen trugen *Joliot* und Mme *Irène Curie-Joliot* sehr wesentlich zu dem schnellen Fortschritt der neuen Wissenschaft, der Kernphysik, bei; sie zeigten 1933, daß gewisse Elemente, die normalerweise stabil sind, Kernreaktionen durchmachen, wenn sie mit α-Strahlen beschossen werden, und dabei neue Atomkerne ergeben. Diese sind Isotope bekannter Elemente, aber unstabil, und sie zerfallen in der für die natürlichen radioaktiven Elemente charakteristischen Weise.

1934 begannen *E. Fermi* und die Physikerschule, die damals mit ihm in *Rom* arbeitete, ein eingehendes Studium der Reaktionen, die entstehen, wenn die Kerne aller Atomarten mit Neutronen beschossen werden. Im Verlauf dieser Arbeit wurden die schwersten bekannten Elemente untersucht, und besonders Uran — mit der Atomnummer 92 — wurde der Neutronenbeschießung unterworfen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, daß neue unstabile Isotope gebildet werden, die radioaktiven Zerfall erleiden.

Es schien daher möglich, durch Beschießen des schwersten bekannten Atoms mit Neutronen im Laboratorium Atome mit höheren Atomnummern — 93 und aufwärts — zu erzeugen, als sie in der Natur vorkommen.

Die weitere experimentelle Arbeit führte aber zu gewissen Schwierigkeiten bei dieser Erklärung, und man fand es unmöglich, in der normalen Anordnung der Atomarten die sehr große Zahl von sogenannten «Transuranen» unterzubringen, die man entdeckte. Zu dieser Zeit nahm man allgemein an, daß die neuen Elemente tatsächlich alle eine höhere Atomnummer als Uran hätten, und ausführliche chemische Prüfungen hatten bewiesen, daß sie bestimmt nicht als irgendeins der Elemente identifiziert werden konnten, die in Atomnummer oder -gewicht unmittelbar unter dem Uran liegen.

Entdeckung der Spaltung

Prof. *O. Hahn* und Dr. *Straßmann* in Berlin begannen sich Ende 1938 für dieses Problem zu interessieren und untersuchten die neuen Elemente noch einmal sorgfältig speziell auf ihre chemischen Eigenschaften.

Im Januar 1939 veröffentlichten sie eine äußerst wichtige Arbeit über einen positiven chemischen Nachweis, daß wenigstens eins der neuen Isotope, von denen man glaubte, sie hätten höhere Atomnummern und -massen als Uran, in Wirklichkeit ein Isotop des Elements Barium sei, dessen Atomnummer und -masse ungefähr die Hälfte derjenigen des Urans sind.

Sofort danach wiesen Dr. *O. Frisch* und Prof. *Lise Meitner* darauf hin, daß diese Entdeckung nur bedeuten konnte, daß, wenn Uran von Neutronen bombardiert wird, eine Kernreaktion absolut anderer Art stattfindet, als man sie bis dahin untersucht hatte, daß nämlich der Urankern sich in zwei Teile von ungefähr gleicher Masse aufspaltet. Dieses Phänomen, für das sie den Namen «Kernspaltung» vorschlugen, konnte mit Hilfe der Theorie der Kernreaktionen erklärt werden, die von Prof. *Bohr* in den vorangehenden Jahren entwickelt worden war. Sie wiesen ferner darauf hin, daß die Bruchstücke des Urankerns mit großer Energie auseinanderfliegen müßten, und diese Voraussage wurde di-

rekt durch Versuche bewiesen, die Dr. *Frisch* in Kopenhagen ausführte.

Eine Bestätigung des Spaltprozesses beim Uran und der größten Energiefreisetzung, die ihn begleitete, erlangten auch Prof. *Joliot* in Paris unabhängig davon (und zu beinahe der gleichen Zeit) sowie andere Physiker in der ganzen Welt, sobald ihnen die ursprüngliche Arbeit bekannt wurde.

Sehr bald darauf, im Frühling 1939, gaben Prof. *Joliot* und seine Mitarbeiter Dr. *Halban* und Dr. *Kowarski* einen experimentellen Nachweis der weiteren Tatsache, die man aus theoretischen Gründen erwartet hatte, daß bei der Uranspaltung auch eine Anzahl freier Neutronen erzeugt wird. Ihre ersten Versuche zeigten, daß es ungefähr drei seien.

Ähnliche Versuche wurden in den Vereinigten Staaten von den Doktoren *Anderson, Fermi, Hanstein, Szilard* und *Zinn* durchgeführt, und sie fanden unabhängig voneinander die Tatsache bestätigt, daß bei der Spaltung eines Uran-Kerns mehr als *ein* freies Neutron erzeugt wird. Man erkannte sofort, daß diese Entdeckung von der größten Bedeutung war, denn durch sie wurde zum erstenmal eine experimentelle Grundlage für die Hoffnung geschaffen, den ungeheuren Vorrat atomarer Energie in der Materie ausnützen zu können.

Diese Hoffnung gründete sich darauf, daß der Spaltprozeß durch ein Neutron eingeleitet und daß anscheinend mehr als *ein* Neutron während des Prozesses frei wird. Die letztere Tatsache eröffnete die Möglichkeit einer Kettenreaktion. Wenn ein Atom in einem Uranblock Spaltung erleidet, so könnten die bei dieser Spaltung ausgesandten Neutronen benützt werden, um die Spaltung in den benachbarten Uranatomen einzuleiten; diese Spaltungen bringen ihrerseits weitere Neutronen hervor, die wieder mehr Uranatome angreifen können usf. So könnte man Bedingungen finden, bei denen ganze Ketten von Spaltungen erzeugt werden, wobei jede Spaltung durch ein Neutron hervorgerufen wird, das in einer vorhergehenden Spaltung freigesetzt wurde. In dieser Weise könnte der Prozeß sich selbst ausbreiten und sich selbst vermehren, so daß, was als Wirkung auf nur ein oder zwei Atome begann, nach kurzer Zeit einen großen Teil der Atome des Uranblocks angreifen könnte. Mit andern Worten, eine Ketten-

reaktion wäre erreicht. Wenn diese Bedingungen verwirklicht werden könnten, so würde die beim Spaltprozeß freigesetzte Energie in großem Maßstab verfügbar gemacht und der Energievorrat in der Materie praktisch ausgenützt werden können.

Daher war es nur natürlich, daß in fast allen Physiklaboratorien der Welt eine große Betriebsamkeit ausbrach mit einer Flut von Veröffentlichungen in der wissenschaftlichen Presse. Das ging so weiter bis zum Ausbruch des Krieges, als das wachsende Gefühl für die möglicherweise große Bedeutung dieser Arbeit Einschränkungen verlangte.

Gewisse wichtige Tatsachen ergaben sich aus den Arbeiten, die während dieser Zeit veröffentlicht wurden, und theoretische Schlußfolgerungen und Erwartungen wurden angekündigt, aber es ist kaum möglich, davon einen chronologischen Bericht zu geben. Es wurde in so vielen Laboratorien daran gearbeitet, und die Ergebnisse, manchmal in einer sehr vorläufigen Form, wurden so vielen Zeitschriften eingesandt und in so wechselnden Abständen nach deren Einsendung veröffentlicht, daß die Prioritäten im einzelnen nicht klar festgelegt werden können.

Jedoch sollte der Besuch erwähnt werden, den Prof. *Bohr* den USA von Januar bis Mai 1939 abstattete. Er konnte den amerikanischen Physikern direkt über die Versuche von Hahn, Frisch und Meitner und über die von ihnen vorgeschlagene Deutung der Ergebnisse berichten. Dazu entwickelte und veröffentlichte Bohr während seines Aufenthalts in den USA, zusammen mit Prof. *J. A. Wheeler* von der Universität Princeton, New Jersey, eine Theorie des Spaltprozesses.

Eine wichtige Voraussage, die auf Grund dieser Theorie gemacht wurde, bezog sich auf das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen Uranisotope. Dieses Element besteht zum größten Teil (99,3 %) aus Atomen der Massenzahl 238, aber es gibt auch ein Isotop (0,7 %) der Masse 235 und einen sehr geringen Bruchteil (0,008 %) eines Isotops der Masse 234. U-238 und U-235 sind die wichtigsten im Zusammenhang mit dem Uranspaltungsprojekt. Bohr sagte im Februar 1939 voraus, daß man von dem gewöhnlichen Isotop U-238 nur Spaltung erwarten könne, wenn die bombardierenden Neutronen eine hohe Energie haben, aber daß das seltene Isotop U-235 sich anders verhalten werde, indem

es diese Reaktion nicht nur mit Neutronen hoher Energie zeigen, sondern sich noch dazu besonders leicht spalten werde, wenn die Energie und darum auch die Geschwindigkeit der bombardierenden Neutronen sehr niedrig sei.

Diese Voraussage wurde tatsächlich im März 1940 bestätigt durch Versuche von *Nier* von der Universität von Minnesota und *Booth, Dunning* und *Grosse* von der Columbia-Universität in New York. Sie verwendeten eine Uran-Probe, in der der Gehalt von U-235 über den normalen Wert mit Hilfe von Niers Massenspektrographen angereichert worden war.

An dieser Stelle ist es wichtig, auf ein anderes Phänomen hinzuweisen, das das Isotop U-238 zeigt, wenn es mit Neutronen bombardiert wird, die einen ziemlich eng definierten Energiewert haben zwischen der recht hohen Energie, die nötig ist, um die Spaltung dieses Isotops hervorzurufen, und der sehr niedrigen Energie, die für die Spaltung von U-235 am wirksamsten ist.

Neutronen, die diese sog. «Resonanz»-Energie haben, werden sehr stark vom U-238-Kern absorbiert, aber es erfolgt keine Spaltung. Statt dessen emittiert der neue Kern, der nun die Massenzahl 239 hat, zwei Elektronen in aufeinanderfolgenden Schritten und wird dadurch zuerst in das Isotop eines Elements mit der Atomnummer 93 verwandelt (für das der Name «Neptunium» vorgeschlagen wurde) und dann in das eines Elements mit der Atomnummer 94. Das letztere wurde vorläufig «Plutonium» genannt, und das Isotop, das aus U-238 nach Resonanz-Einfang eines Neutrons gebildet wird, kann durch das Symbol Pu-239 dargestellt werden. Neptunium und Plutonium sind wahre «Transuran»-Elemente des von Fermi vorausgesagten Typus und kommen in der Natur nicht vor.

Von den beiden ist Pu-239 von besonderem Interesse im Zusammenhang mit dem allgemeinen Spaltungsproblem und der Freisetzung von Atomenergie, weil nach der Bohr-Wheeler-Theorie erwartet werden konnte, daß es die gleichen Eigenschaften wie U-235 zeigen und sich mit der größten Leichtigkeit durch Beschuß mit Neutronen sehr niedriger Energie spalten lassen würde.

Ferner muß die Tatsache erwähnt werden, daß die drei Kernarten U-235, U-238 und Pu-239 nicht die einzigen sind, die sich

spalten lassen. Auch bei den beiden Elementen *vor* Uran in der Atomreihe konnte diese gleiche Eigenschaft nachgewiesen werden. Thorium mit der Atomnummer 90, das nur aus *einem* Isotop mit der Atommasse 232 besteht, verhält sich genau so wie U-238, und Spaltung läßt sich nur erreichen, wenn die bombardierenden Neutronen sehr hohe Energie haben. Das sehr seltene radioaktive Element Protaktinium mit der Atomnummer 91 und der Atommasse 231 verhält sich, was die Spaltung angeht, in einer Weise, die zwischen der von U-235 und U-238 liegt. Auch diese Tatsachen können alle durch die Bohr-Wheeler-Theorie erklärt werden; diese stellt gewisse allgemeine Regeln auf, die für das Verhalten in bezug auf Spaltung bei jedem schweren Kern, bekannt oder unbekannt, zutreffen.

Kettenreaktion und Atombombe

Der vorangehende Überblick über die Entwicklung der Atom- und Kernphysik, obwohl notwendigerweise kurz und unvollständig, zeigte das Wachstum der Idee auf, daß enorme Energiereserven in der Materie enthalten sind; daß diese Energiereserven von ganz anderer Natur als diejenigen bei chemischen Prozessen, wie der Verbrennung von Kohle oder Öl oder der Explosion von TNT oder andern Sprengstoffen, sind; daß die Kernreaktionen, durch die sie freigesetzt werden, eher denen vergleichbar sind, die sich in der Sonne oder den Sternen abspielen oder in den natürlich radioaktiven Elementen, die man auf der Erde findet.

Während sich diese Idee seit der Entdeckung des Phänomens der Radioaktivität am Ende des letzten Jahrhunderts langsam herausbildete und stetig verstärkte, hat man erst seit der Entdeckung des besonderen Phänomens der Spaltung zu Beginn des Jahres 1939 einen klaren Weg gesehen, auf welchem diese Atom- oder Kernenergie in der Materie freigesetzt, kontrolliert und durch Menschen verwendet werden kann.

In den letzten Jahren wurde die enorme Anstrengung zur Lösung dieses Problems, die praktisch ganz von den Vereinigten Staaten getragen wurde, auf die Entwicklung einer Atombombe konzentriert. Sicherheitserwägungen machen es unmöglich, viele der Einzelheiten dieser Arbeit hier aufzudecken, aber im folgenden sollen einige Andeutungen über den Anteil gegeben werden,

der in England geleistet wurde. Bevor wir dies aber tun, dürfte es wertvoll sein, die Natur des Problems in bezug auf die Anwendung der Spaltung zusammenzufassen, wenn man entweder eine heftige Explosion erzeugen oder die Atomenergie unter kontrollierten Bedingungen freisetzen will; und zwar in der Reihenfolge, wie diese Fragen auftauchten, als die Arbeit mit einem neuen Gefühl für ihre Dringlichkeit und Wichtigkeit zu Beginn des Krieges organisiert wurde.

Man nahm allgemein an, daß man eine Kettenreaktion im Uran herbeiführen könne, die enorme Energiebeträge freigeben würde. Auf das gleiche Gewicht bezogen, würde sie millionenfach größer sein als die, welche durch Verbrennung von Kohle oder Öl erzeugt wird. Aber man war sich darüber im klaren, daß, wenn sich diese Kettenreaktion ausbreiten und selbst aufrechterhalten sollte, gewisse kritische Bedingungen erfüllt sein müßten. Erstens muß das ganze System von solcher Größe sein, daß die Wahrscheinlichkeit nicht zu groß wird, daß Neutronen, die im Spaltungsprozeß erzeugt werden, aus dem System entweichen und so nicht mehr weiter an der Kettenreaktion teilnehmen könnten.

Zweitens darf das System nur eine begrenzte Menge Material enthalten, das Neutronen absorbiert und auf diese Weise wiederum ihre Chance vernichtet, an dem sich ausbreitenden Kettenprozeß teilzunehmen.

Drittens beachtete man die Tatsache, daß, wenn die Reaktion nicht «davonlaufen» soll, es wesentlich ist, in den einzelnen Stufen des Kettenprozesses Neutronen sehr niedriger Energie zu brauchen. Nur dann würde es möglich sein, Methoden einzuführen, die es gestatten würden, die Geschwindigkeit der Entwicklung des Prozesses zu kontrollieren. Die Neutronen, die bei der Spaltung erzeugt werden, haben sehr hohe Energien, aber diese werden zerstreut infolge von elastischen Zusammenstößen mit den Kernen anderer vorhandener Atome.

Prof. Joliot und seine Mitarbeiter in Paris, Prof. Fermi und andere Physiker in den USA., und Prof. Sir George Thomson und seine Kollegen in London überlegten sich die Möglichkeit, eine Mischung von Uran und einem geeigneten «Brems»-Mittel zu gebrauchen, das in solcher Weise angeordnet sein sollte, daß die

schnellen Neutronen aus der Spaltung ihre Energien durch elastische Zusammenstöße verlieren, ehe sie weitere Spaltungen im Uran einleiten. Ein geeignetes «Brems»-Mittel darf von allem keine große Einfangwahrscheinlichkeit für Neutronen haben, und seine Atome sollten von so geringer Masse wie möglich sein, um eine maximale Geschwindigkeit des Energieverlusts der Neutronen durch elastische Zusammenstöße zu erhalten. Die passendsten Materialien, die beide Bedingungen erfüllen, waren «schwerer Wasserstoff» oder seine Verbindung «schweres Wasser», Helium, Beryllium und Kohlenstoff.

Anfangs 1940 lenkten Dr. *Frisch* und Prof. *Peierls* von der Universität Birmingham und Prof. Sir James *Chadwick* von der Universität Liverpool unabhängig voneinander die Aufmerksamkeit auf die Möglichkeit, eine militärische Waffe von beispielloser Gewalt herzustellen. Sie wiesen darauf hin, daß eine Kettenreaktion mit langsamen Neutronen keine Explosivwirkung hervorbringen würde, die sehr viel größer wäre als die mit gewöhnlichen Sprengstoffen, daß aber die Explosivwirkungen enorm sein könnten, wenn sich eine Kettenreaktion mit schnellen Neutronen verwirklichen ließe. Man war sich darüber klar, daß gewöhnliches Uran nicht geeignet sei, denn selbst wenn es gelänge, eine schnelle Kettenreaktion damit zu verwirklichen, so würde man dazu eine sehr große Menge des Metalls brauchen. Andererseits bot das Isotop U-235 große Möglichkeiten, wenn es abgetrennt werden konnte. Es schien, daß die für eine Bombe benötigte Menge nicht sehr groß sei, sicher zwischen 1 und 100 kg, und grobe Berechnungen der freigesetzten Energie zeigten, daß die Explosion einer solchen Bombe der von vielen tausend Tonnen TNT gleichwertig sein könnte.

Die Explosion einer Atombombe ist in ihrem Mechanismus sehr verschieden von einer gewöhnlichen chemischen Explosion, denn sie kann sich nur ereignen, wenn die Menge an U-235 größer ist als ein gewisser kritischer Betrag. Das ist der Fall, weil die Reaktion auf der Erhaltung der bei der Spaltung erzeugten Neutronen beruht. In einem Block von reinem oder beinahe reinem U-235 werden die Neutronen entweder in der Metallmasse absorbiert und erzeugen dadurch neue Spaltungen, oder sie entweichen in die Außenluft und sind so vergeudet und ohne Nut-

zen für die Ausbreitung der Reaktion. Der Teil der entweichenden Neutronen kann durch Vergrößerung der Ausmaße des Metallblocks verringert werden, da die Erzeugung der Neutronen ein Volumeneffekt ist und daher mit den Ausmaßen schneller anwächst als der Verlust durch Entweichen, welch letzterer ein Oberflächeneffekt ist. Daraus folgt, daß, wenn die Explosion überhaupt möglich ist, sie eine gewisse Minimalmenge an Material verlangt, die man die kritische Größe nennt. Die Kettenreaktion wird sich so gestalten, daß sich eine Explosion nur ereignet, wenn die Menge an U-235 größer ist als dieser kritische Betrag. Geringere Mengen sind durchaus stabil und vollkommen sicher. Wenn andererseits die Materialmenge die kritische Größe übersteigt, so ist sie unstabil und eine Reaktion wird zustande kommen, sich mit enormer Geschwindigkeit vermehren und in einer Explosion von beispielloser Heftigkeit enden. Alles, was nötig ist, um eine Bombe von U-235 explodieren zu lassen, ist, zwei Stücke zusammenzubringen, von denen jedes allein unter der kritischen Größe ist, die aber zusammen eine Masse bilden, die die kritische Größe übersteigt.

Wenn ein ansehnlicher Teil der Atome in einer Masse von U-235 in sehr kurzer Zeit Spaltung erleidet, so ist die freigesetzte Energie so groß, daß die Masse eine Temperatur von vielen Millionen Grad und einen Druck von vielen Millionen Atmosphären erreicht. Folglich wird sie sich mit großer Geschwindigkeit ausdehnen. Da die Dichte der Masse damit abnimmt, können die Neutronen leichter aus ihr entweichen, und die Kettenreaktion wird aufhören. Um einen ansehnlichen Teil der verfügbaren Energie freizusetzen, ist es daher nötig, daß sich die Reaktion so schnell ausbildet, daß ein wesentlicher Teil des Materials reagieren kann, bevor das System Zeit hat, auseinanderzufliegen. Die im Spaltprozeß erzeugten Neutronen sind schnell genug, um diese Bedingung zu erfüllen (aber nicht, wenn sie künstlich abgebremst werden, wie in den vorhergehenden Absätzen erwähnt wurde). Das Zeitintervall zwischen Anfang und Ende der Kernreaktion ist äußerst kurz. Während dieses Intervalls wird sich die Masse so weit ausgedehnt haben, daß die Kernreaktion wegen des Entweichens der Neutronen abbricht. Während dieses Intervalls sollte ein wesentlicher Teil der Masse von U-235 Spaltung

erleiden und dabei einen großen Energiebetrag freisetzen. Wenn nur ein Pfund U-235 angegriffen wird, so wird diese Energiefreisetzung ebenso groß sein wie die von 8000 Tonnen TNT.

DIE VERWIRKLICHUNG DER ATOMBOMBE. BRITISCHE ARBEIT UND ORGANISATION

PROF. SIR GEORGE THOMSON'S KOMITEE

Im April 1940 wurde ein Komitee von Wissenschaftlern mit Prof. Sir George Thomson als Vorsitzendem eingesetzt und ursprünglich dem Luftfahrtministerium, später dem Ministerium für Flugzeugproduktion unterstellt. Dieses Komitee hatte die Aufgabe, das ganze Problem zu überprüfen, die schon im Gange befindlichen Arbeiten zu koordinieren und so schnell wie möglich darüber Bericht zu erstatten, ob die Möglichkeit, Atombomben noch während dieses Krieges zu erzeugen, und ob ihre militärische Wirksamkeit genügend groß seien, um die für diesen Zweck nötige Ablenkung von den übrigen Kriegsanstrengungen zu rechtfertigen.

Der erste zu unternehmende Schritt war die Feststellung der Kerndaten, von denen die Möglichkeit einer Atombombe abhing und die ihre Größe bestimmten. Diese Arbeit war bereits Anfang 1940 in Liverpool unter Prof. Sir James *Chadwick* begonnen worden, und sie wurde nun beschleunigt fortgeführt mit Dr. *Frisch* und Dr. *Rotblat* als leitenden Mitarbeitern. Als sich die Arbeit entwickelte und neue Probleme auftauchten, wurde sie auf das Cavendish-Laboratorium in Cambridge ausgedehnt unter Leitung von Dr. *Feather* und Dr. *Bretscher*. Das hatte auch den Vorteil einer gewissen Sicherung gegen eine mögliche Unterbrechung durch feindliche Bombardierungen, denen das Laboratorium in Liverpool einigermaßen ausgesetzt war.

Die vielen theoretischen Aspekte des Problems wurden von Prof. *Peierls* untersucht, unter der Mithilfe von Dr. *Fuchs* und anderen an der Universität Birmingham und ferner von Dr. M. H. L. *Pryce* in Liverpool. Sie benützten die experimentellen Daten aus Liverpool und Cambridge, um die kritische Größe der Bombe zu berechnen, untersuchten den Mechanismus der Reak-

tion, berechneten den Energiebetrag, der wahrscheinlich bei einer Atomexplosion freigesetzt würde, und studierten die Bedingungen, um diesen Betrag zu erhöhen. Prof. Sir Geoffrey *Taylor* von Cambridge untersuchte gewisse Punkte bezüglich der Wirkung, die man von der Explosion einer Atombombe erwarten konnte.

Dies war natürlich nur eine Seite des Problems, denn es wäre von keinem unmittelbaren praktischen Nutzen gewesen, zu zeigen, daß eine Atombombe hergestellt werden könne unter der Voraussetzung, daß eine gewisse Menge von U-235 zur Verfügung stehe; man mußte auch nachweisen, daß eine vernünftige Möglichkeit vorhanden sei, eine derartige Menge von U-235 aus gewöhnlichem Uran in nützlicher Frist abzutrennen.

Dieser Aspekt des Problems wurde von dem Komitee gleichfalls in Erwägung gezogen. Es wurde schon erwähnt, daß die Isotope eines Elements praktisch identische chemische Eigenschaften haben und daß infolgedessen Trennprozesse deren Massenunterschied ausnützen müssen. Im Fall der Uranisotope ist der relative Massenunterschied sehr klein, und das schon an sich schwierige Problem wird ungeheuer groß. In den frühen Stadien der Arbeit konnte man nicht viel experimentieren wegen des Mangels an Personal und an Einrichtungen, aber *eine* Trennmethode wurde immerhin in Liverpool untersucht, jedoch erwies sie sich nicht als erfolgverheißend. Es gibt natürlich mehrere Methoden, um Isotope für Laboratoriumszwecke zu trennen. Diese wurden vom Komitee sehr sorgfältig geprüft in dem Bewußtsein, daß es wesentlich sei, die vermutlich wirtschaftlichste Methode zu wählen und sich hierauf zu konzentrieren; denn Englands Arbeitskräfte und industrielle Hilfsmittel waren durch die Produktion für unmittelbare Kriegsbedürfnisse schon voll beschäftigt. Das Komitee kam zu dem Schluß, daß die Diffusion von Gasen die am meisten erfolgversprechende Methode für Großproduktion sei. Sie ist auf physikalischen Prinzipien aufgebaut, die man seit langem völlig versteht und die leicht zu berechnen sind, und man vermutete, daß sie keine so großen Anforderungen an hochgradige Präzisionsarbeit stelle.

Die Forschungen über diese Trennmethode wurden von einer Arbeitsgemeinschaft unter der Leitung von Dr. F. E. *Simon* im Clarendon-Laboratorium in Oxford aufgenommen. In theoreti-

scher Hinsicht half ihnen Prof. *Peierls* und seine Gruppe, in chemischer Prof. W. N. *Haworth* und eine Gruppe von Leuten unter seiner Leitung in der Abteilung für Chemie der Universität Birmingham. Die Metropolitan-Vickers Electrical Company und die Imperial Chemical Industries Ltd. wurden über viele einschlägige technische Probleme um Rat gefragt. Auch am Imperial College der Universität London wurde einige experimentelle Arbeit über die Diffusionsmethode begonnen.

Im Frühsommer 1941 kam das Komitee zur Überzeugung, daß die Ausführbarkeit einer militärischen Waffe auf der Basis der Atomenergie endgültig feststehe, daß diese Waffe beispiellose Zerstörungsgewalt haben werde, daß eine Methode, um die erforderlichen Materialmengen zu erzeugen, in Aussicht sei und daß die für die Ausführung des Projekts nötige industrielle Anstrengung einigermaßen abgeschätzt werden könne. Dementsprechend verfaßte das Komitee einen vom 15. Juli 1941 datierten Bericht, der die Ergebnisse zusammenfaßte und Vorschläge für die Verfolgung des Projekts in großem Maßstab machte.

Durch Übereinkunft zwischen dem Minister für Flugzeugproduktion und dem Präsidenten des Staatsrates (Lord President of the Council) wurde dieser Bericht dem Beratenden Wissenschaftlichen Komitee des Kriegskabinetts (Scientific Advisory Committee of the War Cabinet) übergeben, dessen derzeitiger Vorsitzender Lord Hankey war.

An diesem Punkt ist es angezeigt, zu überlegen, was schon erreicht war und was noch zu tun übrig blieb.

Die Experimente über die Kerneigenschaften des Urans hatten bestätigt, daß gewöhnliches Uran für eine Atombombe nutzlos sei und daß es nötig sein würde, das Isotop U-235 zu benutzen, das in gewöhnlichem Uran nur im Umfang von 0,7 % vorhanden ist. Sie hatten weiter gezeigt, daß, wenn reines oder beinahe reines U-235 in genügender Menge vorhanden ist, eine Kettenreaktion sich ausbilden kann, die eine Explosion von extremer Heftigkeit ergibt. Die erhaltenen Daten genügten, um die benötigte Menge U-235 abzuschätzen, aber diese Abschätzung war sehr roh und die kritische Größe nur bis auf einen Faktor 3 bekannt.

Die theoretische Arbeit hatte das frühere Resultat bestätigt, daß der bei einer Atomexplosion freigesetzte Energiebetrag sehr

groß sein würde, verglichen mit der Wirkung gewöhnlicher Bomben. Berechnungen waren über die Wirkung von «Puffern» und über die geeignetste Größe der Bombe gemacht worden. Man hatte sich die Methode des Zusammenfügens des Materials zum Gebrauch als Waffe und die Zündmethode überlegt, aber es waren noch keine Experimente gemacht.

Bezüglich des Problems der Produktion von U-235 hatte man entschieden, sich auf die Gas-Diffusions-Methode zu konzentrieren, und Forschung und Entwicklung hatten sich in einigen Beziehungen als sehr vielversprechend erwiesen. Ein Plan war von Dr. Simon und Prof. Peierls vorgelegt worden, der bis zum ersten Ausführungsstadium gediehen war. Führende Experten industrieller Firmen waren konsultiert worden; auch sie waren der Ansicht, daß es möglich sein sollte, eine befriedigende Anlage zu bauen, obgleich Schwierigkeiten vorauszusehen waren. Es waren Schätzungen vorhanden über die Kosten einer Anlage, die angemessene Mengen von U-235 liefern konnte, und über die nötige Zeit, um sie zu bauen.

Kurz, das Komitee war völlig überzeugt, daß eine Atombombe auf Grund der Spaltung von U-235 ausführbar war, daß ihre Wirkung mit der von einigen tausend Tonnen TNT vergleichbar sein würde und daß eine Methode zur Abtrennung von U-235 aus gewöhnlichem Uran in großem Maßstab verwirklicht werden könnte, so daß man ausreichende Mengen des Materials erhalten werde.

Zugegebenermaßen blieb in jeder Beziehung noch ein großer Teil von Arbeit am Projekt zu tun. Genauere Kerndaten waren erforderlich, damit z. B. die kritische Größe mit höherer Genauigkeit bestimmt werden konnte; einige Punkte bedurften der Bestätigung; die Methoden der Zusammenfügung und der Zündung mußten gründlich geprüft werden. Das Hauptproblem war aber der Entwurf und die Konstruktion einer Großanlage zur Abtrennung von U-235. Wie das Komitee ausführte, ist es eine hervorragende Schwierigkeit des Atombombenplans, daß die Bombe nicht in kleinem Maßstab ausprobiert werden kann; man erreicht alles oder nichts. Die Festigkeit, mit der das Komitee überzeugt war, daß es tatsächlich alles und nicht nichts sein werde, kann an dem Wagemut ermessen werden, mit dem es ein Projekt

von dieser Größe vorlegte zu einem Zeitpunkt, als einige der wichtigsten Teile des Plans noch in den Anfangsstadien waren.

Ein anderer wichtiger Gesichtspunkt bei der Anwendung der Uranspaltung wurde ebenfalls von dem Komitee überprüft. Das war die Frage der Möglichkeit (wovon schon in einem früheren Abschnitt dieses Berichts die Rede war), Bedingungen zu finden, unter denen eine Mischung aus Uran und einem geeigneten «Brems»-Mittel eine Kettenreaktion geben würde, bei der die Energie in kontrollierter Weise frei würde. Diese Arbeit wurde in Cambridge von Dr. Halban und Dr. Kowarski ausgeführt.

Prof. Joliot hatte diese beiden französischen Physiker zur Zeit der Unterwerfung Frankreichs im Juni 1940 nach Cambridge gesandt.

Sie brachten 165 l «schweres Wasser» mit — praktisch den ganzen in der Welt vorhandenen Vorrat an diesem Material —, das die französische Regierung von der Norsk Hydro Company gerade noch vor der Invasion Norwegens erhalten hatte. Dr. Halban und Dr. Kowarski waren von Prof. Joliot instruiert worden, keine Mühe zu scheuen, um in England die nötigen Apparate zu erhalten, mit denen sie mit Unterstützung der britischen Regierung und im gemeinsamen Interesse der Alliierten die entscheidenden Experimente ausführen könnten, die in Paris geplant und für die das «schwere Wasser» erworben worden war.

Die Gelegenheit wurde ihnen im Cavendish-Laboratorium in Cambridge geboten, und bis Dezember 1940 erbrachten sie einen starken Hinweis, daß in einem System aus Uranoxyd (wie sie es tatsächlich verwendeten) oder aus Uranmetall und «schwerem Wasser» als Bremsmittel eine sich ausbreitende Spaltungskettenreaktion mit langsamen Neutronen verwirklicht werden könnte, wenn das System genügend groß sei.

Es hatte den Anschein, daß bei Gebrauch von Uranmetall diese kritische Größe nur wenige Tonnen «schweren Wassers» erfordern würde.

Das Komitee zog den Schluß, daß diese Arbeit möglicherweise großes Interesse für die Energieproduktion habe, aber daß diese besondere Anwendung wahrscheinlich nicht rechtzeitig für den Kriegsgebrauch ausgebildet werden könnte.

Man erkannte jedoch, daß die Arbeit über langsame Neutro-

nen für das militärische Projekt von Wichtigkeit sei, denn das Plutonium, das in einem solchen System erzeugt würde, konnte chemisch extrahiert werden und war eventuell in einer Atombombe an Stelle von U-235 verwendbar. Die Schwierigkeiten, ein System mit langsamen Neutronen aufzubauen, schienen zur damaligen Zeit unüberwindlich. Um die für eine Bombe erforderlichen Plutoniummengen zu erzeugen, auf die man aus der Analogie mit U-235 schloß, wären viele Tonnen Uran und viele Tonnen «schweres Wasser» nötig gewesen. Besonders das letztere würde eine bedeutende industrielle Anspannung verlangt haben.

Während dieser Periode von April 1940 bis Juli 1941 beschäftigten ähnliche Probleme die Köpfe der amerikanischen Wissenschaftler. Der Kontakt wurde teilweise aufrecht erhalten durch Mitteilung von Berichten mit Hilfe des normalen wissenschaftlichen Verbindungsapparates und teilweise durch Besuche in beiden Richtungen, die Wissenschaftler in allgemein wissenschaftlichen Missionen machten.

Prof. Bainbridge vom Forschungskomitee für Nationale Verteidigung von Amerika (National Defense Research Committee of Amerika — NDRC) war im April 1941 in England, und Prof. Lauritsen (NDRC) war im Juli des gleichen Jahres in England in allgemeinen wissenschaftlichen Angelegenheiten. Beide wurden eingeladen, Zusammenkünften von Sir George Thomson's Komitee beizuwohnen.

Direktorat für Röhrenlegierungen, D. S. I. R.[1]

Das Beratende Wissenschaftliche Komitee des Kriegskabinetts, dessen Vorsitzender Lord Hankey war, bestätigte die Ansicht des Komitees von Sir George Thomson über die Bedeutung der Atombombe mit dem Ergebnis, daß Mr. Churchill, der über die Entwicklung durch Lord Cherwell auf dem laufenden gehalten worden war, Sir John *Anderson* im September 1941 bat, die persönliche Verantwortung für die Überwachung des äußerst dringlichen und geheimen Projekts zu übernehmen. Um ihn zu unterstützen, stellte er unter seinem Vorsitz eine beratende Kommission zusammen, deren Mitglieder die folgenden waren: der

[1] Anfangsbuchstaben von *D*epartment, *S*cience, *I*ndustry, *R*esearch.

Vorsitzende des Beratenden Wissenschaftlichen Komitees des Kriegskabinetts (Lord Hankey und später Mr. R. A. Butler), der Präsident der Royal Society (Sir Henry Dale), der Sekretär des Departements für Wissenschaftliche und Industrielle Forschung (Department of Scientific and Industrial Research — Sir Edward Appleton) und Lord Cherwell. Um die Kontinuität zu sichern, nahm der Minister für Flugzeugproduktion, Lord Brabazon of Tara, zu Anfang an dieser Kommission teil.

Die Leitung der Arbeit wurde einer neuen Abteilung des Departments für Wissenschaftliche und Industrielle Forschung anvertraut und fiel so unter die allgemeine administrative Aufgabe von Sir Edward Appleton als Sekretär des Departments. Aus Sicherheitsgründen war sie unter dem Namen «Direktorat für Röhrenlegierungen» (Directorate of Tube Alloys) bekannt. Mr. W. A. *Akers* wurde auf Sir John Andersons Ersuchen von der Verwaltung der Imperial Chemical Industries Ltd. entbunden, um als Direktor zu amten, mit unmittelbarem Zutritt zum Ministerium in allen Fragen der weiteren Planung.

Mr. Akers hatte als Stellvertreter und Hauptassistenten Mr. M. W. *Perrin,* der gleichfalls von den Imperial Chemical Industries zur Verfügung gestellt worden war. Akers wurde von einem technischen Komitee unter seinem Vorsitz beraten, das aus den Wissenschaftlern, die die verschiedenen Abteilungen der Arbeiten leiteten, und einigen andern bestand. Die ursprünglichen Mitglieder waren Prof. Sir James Chadwick, Prof. Peierls und die Doktoren Halban, Simon und Slade, mit Mr. Perrin als Sekretär. Später kamen noch Sir Charles Darwin und die Professoren Cockcroft, Oliphant und Feather hinzu.

Besuch einer USA-Mission in Grossbritannien im November 1941

Im November 1941, zur Zeit, als die neue T. A. (Tube Alloys)-Organisation aufgebaut wurde, kam eine amerikanische Mission, bestehend aus den Professoren Pegram und Urey von der Columbia-Universität, nach England, um die experimentelle und theoretische Arbeit zu studieren, die bisher am T. A.-Projekt geleistet worden war, um unsere Ideen über die zukünftige Arbeit

zu erfahren und um ein Abkommen über vollständigen und raschen Informationsaustausch zu schließen.

Sie besuchten alle Stätten, wo T. A.-Arbeit im Gange war, und nahmen an einer Sitzung des neuen Technischen T. A.-Komitees (T. A. Technical Committee) teil, an der der Fortschritt überprüft und neue Programme diskutiert wurden.

Besuch einer britischen T. A.-Mission in den USA vom Februar bis April 1942

Unter der neuen Organisation wurde eine große Erweiterung der Arbeit sowohl in den Universitäts- wie in den industriellen Laboratorien in Angriff genommen; auch in den USA folgte auf die Rückkehr der Professoren Pegram und Urey von England eine sehr intensivierte T. A.-Anstrengung. Eine Mission, die sich aus Mr. Akers, Dr. Halban, Prof. Peierls und Dr. Simon zusammensetzte, besuchte Amerika Anfang 1942, um sicherzustellen, daß die Programme, die im Vereinigten Königreich geplant waren, so wirksam wie möglich mit der amerikanischen Arbeit koordiniert würden.

Jeder Abschnitt des amerikanischen Programms wurde im einzelnen geprüft, und es war schon damals klar, daß die neue amerikanische T. A.-Organisation die Absicht hatte, den vollsten Gebrauch von den enormen, an den Universitäten und in der Industrie verfügbaren Hilfsquellen zu machen.

Das britische T. A.-Programm

Im Jahre 1942 war es klar, daß der Umfang, in dem Forschung und Entwicklung im Vereinigten Königreich unternommen werden könnte, weit kleiner sein müßte als in Amerika, obgleich das Projekt sehr hohe Prioritätsrechte erhielt. Aber ein großer Teil der qualifizierten Physiker war mit anderer dringender Kriegsarbeit beschäftigt, und die industriellen Hilfsmittel waren in Großbritannien zu der Zeit in viel höherem Maße von der Kriegsproduktion in Anspruch genommen, als das in den USA der Fall war. Infolgedessen war es notwendig, das Gebiet der T. A.-Untersuchungen zu beschränken.

Im großen und ganzen waren die gewählten Programme: Be-

stimmung von wesentlichen kernphysikalischen Daten; theoretische Untersuchungen über die Kettenreaktion in einer Atombombe, die Dimensionen und der Entwurf einer Atombombe und ihre Explosionswirkung; das Gasdiffusionsverfahren zur U-235-Abtrennung. Dieses Programm schloß theoretische und experimentelle Forschung ein über das Verfahren, den Entwurf und die Produktion von Mustermaschinen, die Herstellung der benötigten Materialien, Studien über Konstruktionsmaterialien etc.; Untersuchung von Systemen, in denen sich langsame Neutronen ausbreiten, besonders mit schwerem Wasser als Bremsmittel; die Herstellung von Uraniummetall für Systeme mit langsamen Neutronen in «Erzeugungseinheiten»; die Herstellung von schwerem Wasser.

Placierung der Arbeit

Experimentelle Bestimmung von kernphysikalischen Daten. Die Forschungsgruppen an den Universitäten von Liverpool und Cambridge wurden beträchtlich verstärkt, und kleine Programme wurden an den Universitäten von Bristol und Manchester in Angriff genommen. Prof. Sir James Chadwick besorgte die allgemeine Überwachung dieser ganzen Arbeit.

System mit langsamen Neutronen. Diese Arbeit wurde in Cambridge unter Dr. Halban und Dr. Kowarski mit Unterstützung von Dr. Bretscher fortgesetzt.

Theoretische Untersuchungen der Kettenreaktion etc. Prof. Peierls und seine Gruppe setzten ihre Studien in Birmingham fort, bei besonderen Problemen unter Mitarbeit von Prof. Dirac in Cambridge. Später, als Prof. Peierls nach den Vereinigten Staaten ging, leitete Dr. A. H. Wilson diese Gruppe.

Das Gasdiffusionsverfahren

Universitätsforschung. Die experimentelle Arbeit unterlag der allgemeinen Leitung von Dr. Simon. Seine erweiterte Gruppe im Clarendon-Laboratorium hatte Mr. Arms, Dr. Kurti und Dr. Kuhn als Leiter. Das theoretische Studium des Verfahrens blieb in den Händen von Prof. Peierls und seiner Gruppe in Birmingham. Ebenfalls an der Universität von Birmingham hatte Prof. Haworth, der von den Tagen des Thomson-Komitees an sehr aktiv

beim T. A. gewesen war, eine Gruppe, die an einer Anzahl von mit dem Diffusionsprojekt verknüpften chemischen Problemen arbeitete.

Forschung und Entwicklung in industriellen Arbeitsstätten

Die Metropolitan-Vickers Electrical Co. Ltd. schloß einen Kontrakt über Entwurf und Bau von gewissen Mustermaschinen, die die von Dr. Simon und Prof. Peierls ausgearbeiteten Prinzipien verwerten sollten. Der erfolgreiche Bau dieser Maschinen war eine beträchtliche technische Leistung in Anbetracht der neuen Verfahren, die zur Verwendung gelangten. Sie wurden später zugunsten eines einfacheren Entwurfs aufgegeben, der gewisse Vorteile im Betrieb hatte.

Mit den Imperial Chemical Industries Ltd. (I. C. I.) wurde ein Kontrakt über die Entwicklung der Diffusionsanlage als Ganzes geschlossen; die Arbeit wurde von der Billingham-Abteilung dieser Gesellschaft ausgeführt. Dieses Programm war sehr umfangreich, da es alles enthielt, was mit dem Entwurf einer vollständigen Anlage zusammenhing, einschließlich der Ausarbeitung von Strömungswänden, Forschung über Konstruktiosmaterialien und Entwicklung von neuen Typen von Ventilen, Instrumenten etc., um den neuen Verhältnissen zu genügen.

Bei dieser Arbeit wurde sie unterstützt von der Metallabteilung der I. C. I., die verschiedene Fabrikationsverfahren studierte. Die I. C. I. Metals Ltd. hatte als Unterkontrahenten Percy Lund Humphries and Co. Ltd. und die Sun Engraving Co. Ltd., die durch Dr. Banks koordiniert wurden; seine Dienste waren von der Printing and Allied Trades Research Association zur Verfügung gestellt worden. Die Metallisation Ltd. gab ebenfalls einen wertvollen Beitrag zu diesem Abschnitt der Arbeit.

Die Verfahren zur Herstellung vieler besonderer Chemikalien, die erforderlich waren, wurden von der allgemeinen Chemikalienabteilung der I. C. I. mit Unterstützung der Farbstoffabteilung ausgearbeitet.

Die Mond Nickel Co. Ltd. machte unter einem besonderen Kontrakt eine sehr erfolgreiche Untersuchung über gewisse metallurgische Probleme.

Obgleich einiges aus diesen Forschungsprogrammen noch kurze Zeit weitergeführt werden wird, im wesentlichen, um die optimalen Bedingungen festzustellen, konnte die Billingham-Abteilung der I. C. I. das Hauptprogramm abschließen, nachdem sie Strömungswände hergestellt und Diffusionsanlagen entworfen hatte, die unter recht mannigfachen Bedingungen betrieben werden können.

Im großen und ganzen ist die Anlage natürlich der amerikanischen Diffusionsanlage, die jetzt in Betrieb ist, ähnlich, aber sie hat doch auch gewisse eigene Züge.

Die Herstellung von Uran-Metall

Die I. C. I. Ltd. (Allgemeine Chemikalienabteilung) übernahm die Herstellug von Uranmetall und entwickelte erfolgreich eine befriedigende Methode.

Die Verarbeitung des Metalls zu Stäben, wie sie für eine «Erzeugungseinheit» erforderlich waren, wurde von der Metallabteilung der I. C. I. in Angriff genommen.

Man sah bald, daß viele Probleme ein weiteres Studium im Zusammenhang mit den physikalischen, metallurgischen und chemischen Eigenschaften des Metalls verlangten. Die Forschung über diese Punkte wurde ausgeführt vom National Physical Laboratory, von Dr. Simon in Oxford mit einer Untergruppe in Birmingham, von der britischen Forschungsgesellschaft für Nichteisenmetalle, von Dr. Crowan in Cambridge und von der Alkali-Abteilung der I. C. I.

Schweres Wasser

Die Billingham-Abteilung der I. C. I., die einige Erfahrung in der Abtrennung von «schwerem Wasser» für Laboratoriumszwecke hatte, wurde gebeten, einen Plan für die Großproduktion dieses Stoffes aufzustellen.

Nach Untersuchung verschiedener Methoden berichtete sie, daß das für Großbritannien geeignetste Verfahren, wenn in erster Linie rasche Konstruktionsmöglichkeit und Betriebssicherheit verlangt werden, das elektrolytische Verfahren sei unter Benutzung des katalytischen Austauschprinzips in der Dampfphase,

das von Prof. Taylor von der Universität Princeton, U. S. A., eingeführt worden war.

Strömungswände und Entwürfe für eine Anlage wurden vorbereitet, in der das Austauschsystem eine neuartige Konstruktion aufwies, von der man glaubte, daß sie einfacher und wirksamer sei als irgend eine, die man bisher gebraucht oder vorgeschlagen hatte.

Die elektromagnetische Methode

Durch den Informationsdienst erfuhren wir von der bemerkenswerten Entwicklungsarbeit, die an der Universität von Californien unter Prof. E. O. Lawrence durchgeführt wurde mit dem Ziel, den Massenspektrographen, der für die Trennung winziger Mengen von Isotopen gebraucht wurde, in einen Großproduktionsapparat zu verwandeln.

Aber man entschied sich, keine entsprechende Forschung in Großbritannien zu beginnen, da der für diese Arbeit am besten geeignete Physiker, Prof. Oliphant in Birmingham, durch andere dringende Kriegsarbeit in Anspruch genommen war.

Im Jahre 1943 wurde es möglich, ihn von dieser Arbeit freizumachen, so daß man beschloß, ein Forschungsprogramm über diese Methode in Birmingham in Angriff zu nehmen. Bevor aber die Arbeit wirklich begonnen hatte, besuchte Prof. Oliphant Amerika zur Durchführung von Besprechungen über eine engere gegenseitige Ergänzung der britischen und amerikanischen T. A.-Anstrengungen; dabei kam man überein, wie weiter unten beschrieben wird, daß es im allgemeinen Interesse am wirksamsten sei, wenn Prof. Oliphant und die meisten seiner Gruppe in die Vereinigten Staaten übersiedelten.

Das britische elektromagnetische Programm wurde daher aufgegeben.

Nach Prof. Oliphants Rückkehr ins Vereinigte Königreich im März 1945 beschloß man, daß die Forschung an einigen elektrisch-technischen Problemen dieser Betriebsart einsetzen sollte. Mit diesem Ziel wurden Kontrakte abgeschlossen mit der British Thomson-Houston Company, der General Electric Company und der Metropolitan-Vickers Electrical Company. Überdies hatten die erste und die letzte dieser Gesellschaften schon beträchtliche

Hilfe geleistet, indem sie der britischen T. A.-Organisation die Dienste von Dr. V. J. R. Wilkinson, Dr. T. E. Allibone und anderer Physiker und Ingenieure zur Verfügung gestellt hatten.

Koordinierung der Programme

Man ersieht aus dem Bericht über das Forschungsprojekt für die Diffusionsanlage, daß zahlreiche Universitäten und industrielle Arbeitsgemeinschaften damit befaßt waren, so daß eine geeignete Koordinierung der Arbeit eine wichtige Angelegenheit wurde.

Dasselbe galt für die Arbeit zur Produktion von Uran-Metall und seiner Metallurgie.

Es war auch klar, daß manches von der chemischen Forschung, die für ein bestimmtes Projekt ausgeführt wurde, auch von Interesse für ein anderes sein konnte.

Um eine befriedigende Koordinierung der Arbeit zu sichern, wurden verschiedene Komitees und Gruppen von Sachverständigen bestellt.

Das Diffusions-Projekt-Komitee, das dem technischen T. A.-Komitee zu berichten hatte, behandelte die Diffusionsarbeit.

Die Mitglieder dieses Komitees waren: Mr. W. A. Akers, Direktor der T. A. (D. S. I. R.), Vorsitzender; Major K. Gordon (später Dr. G. I. Higson), Billingham-Abteilung der I. C. I., stellvertretender Vorsitzender; Dr. F. E. Simon und Mr. H. S. Arms, Universität Oxford; Prof. R. Peierls (später Dr. A. H. Wilson), Universität Birmingham; Mr. J. D. Brown, Dr. J. B. Harding, Mr. C. F. Kearton, Mr. S. Labrow und Mr. J. R. Park, Billingham-Abteilung der I. C. I.; Mr. N. Elce und Mr. H. Smethurst, Metropolitan-Vickers Electrical Company; Mr. M. J. S. Clapham und Mr. S. S. Smith, Metall-Abteilung der I. C. I.; Mr. M. W. Perrin, Direktion (D. S. I. R.), Sekretäre.

Die chemische Forschung wurde von einer Sachverständigengruppe koordiniert, die dem technischen T. A.-Komitee zu berichten hatte. Die Zusammensetzung dieser Gruppe war: Prof. W. N. Haworth, Universität Birmingham, Vorsitzender; Dr. R. E. Slade, I. C. I., Vize-Vorsitzender; Dr. F. E. Simon, Universität Oxford; Dr. J. P. Baxter, I. C. I., Abteilung für Allgemeine Chemikalien; Dr. J. Ferguson, I. C. I., Alkali-Abteilung; Mr. J. R. Park, Billing-

ham-Abteilung der I. C. I.; Mr. M. W. Perrin, T. A.-Direktion (D. S. I. R.), Sekretär.

Die Uranmetallproduktion und metallurgische Angelegenheiten wurden von einer Gruppe von Metallsachverständigen bearbeitet, deren Mitglieder waren: Mr. E. Colbeck, I. C. I., Alkali-Abteilung, Vorsitzender; Dr. W. O. Alexander, I. C. I., Metall-Abteilung; Dr. N. P. Allen, National Physical Laboratory; Mr. G. L. Bailey, British Non-Ferrous Metals Research Association (Britische Nichteisenmetall-Forschungsgesellschaft); Dr. A. M. Roberts, I. C. I., Abteilung für Allgemeine Chemikalien; Mr. D. C. G. Gattiker, T. A.-Direktion (D. S. I. R.), Sekretär.

Forschungskontrakte, Patente

Die Kontrakte, unter denen die Forschung in den Universitätslaboratorien durchgeführt wird, enthalten Klauseln, die alle Entdeckungen, Erfindungen und anderen Ergebnisse der Arbeit ausschließlich der Regierung vorbehalten.

Bei Forschungen in industriellen Firmen werden alle Resultate, Erfindungen und Detail-Entwicklungen, soweit sie im T. A.-Bereich anwendbar sind, ausschließliches Eigentum der Regierung.

Soweit eine Erfindung auch außerhalb des T. A.-Bereichs benutzbar ist, wurde vorgesehen, daß ihre Anwendung außerhalb des T. A.-Bereichs der Industrie zugänglich gemacht werden kann.

Es liegt bei der Regierung, zu entscheiden, ob im konkreten Fall Anwendung außerhalb des T. A.-Bereichs liegt oder nicht.

Fragen, die sich auf Erfindungen und Patente beziehen, werden von einem kleinen Patent-Komitee behandelt, das sich folgendermaßen zusammensetzt: Mr. A. Block, D. S. I. R., Vorsitzender; Mr. W. A. Akers, T. A.-Direktion (D. S. I. R.); Mr. M. W. Perrin, T. A.-Direktion (D. S. I. R.).

Das gemeinsame britisch-kanadisch-amerikanische Projekt über langsame Neutronen in Kanada

Während des Frühjahrs 1942 fand man, daß die in Cambridge betriebene Forschung über langsame Neutronen schneller und

wirksamer vorankommen würde, wenn man sie an einen Ort in größerer Nähe von Chicago verlegte, wo die entsprechende amerikanische Arbeit ausgeführt wurde.

Man machte der kanadischen Regierung den Vorschlag, eine gemeinsame britisch-kanadische Forschungsstätte zu errichten, wo man in engem Kontakt mit der amerikanischen Gruppe arbeiten könnte.

Die kanadische Regierung hieß diese Anregung gut, und so wurde zu Beginn 1943 eine große Forschungsstätte in Montreal eingerichtet unter der allgemeinen Leitung des Nationalen Forschungsrats von Kanada (National Research Council of Canada).

Praktisch die ganze Cambridge-Gruppe unter Dr. Halban übersiedelte nach Montreal, wo der Forschungsstab schnell durch zahlreiche kanadische Wissenschaftler, mehrere neue Mitarbeiter aus dem Vereinigten Königreich und einige aus den Vereinigten Staaten vergrößert wurde.

Das Laboratorium wurde zuerst von Dr. Halban geleitet. Diese Stellung gab er Anfang 1944 auf, und Prof. J. D. Cockcroft wurde zu seinem Nachfolger bestimmt.

Vom Frühling 1944 an beteiligten sich die Amerikaner aktiv an diesem Projekt, das damit ein gemeinsames britisch-kanadisch-amerikanisches Unternehmen wurde. Sein Rahmen wurde erweitert, und 1944 wählte man ein Terrain am Ottawa-Fluß bei Petawawa, Ontario, zum Bau einer Versuchs-«Einheit», die (von der Regierung der Vereinigten Staaten geliefertes) «schweres Wasser» als Bremsmittel benutzte.

Dieses gemeinsame Unternehmen in Kanada wird ausführlicher in Berichten der kanadischen Regierung beschrieben. Es bedeutet einen großen Beitrag, sowohl an Menschen wie an Geld, seitens der kanadischen Regierung zur Entwicklung dieses neuen Wissenschaftszweiges und zu seiner Anwendung.

Übersiedlung von britischen T. A.-Forschungsgruppen nach den Vereinigten Staaten

Im August 1943 besuchte Sir John Anderson Amerika und besprach mit den US-Autoritäten die Möglichkeiten, um die Zusammenarbeit zwischen den beiden Ländern auf eine offiziellere Basis zu bringen. In der Folge fanden weitere Besprechungen

zwischen Präsident Roosevelt und Mr. Curchill statt, die zur Einsetzung des Vereinigten Planungs-Komitees (Combined Policy Committee) in Washington führten.

Prof. Sir James Chadwick wurde zum wissenschaftlichen Berater der britischen Mitglieder dieses Komitees ernannt; er untersuchte zusammen mit den Verantwortlichen für die wissenschaftliche und technische Leitung des amerikanischen Projekts die Frage, ob man zur Koordinierung der wissenschaftlichen und technischen Anstrengungen irgendwelche weiteren Schritte unternehmen könnte, die die Erzeugung von Atombomben in den Vereinigten Staaten beschleunigen würden.

Als Ergebnis dieser Besprechungen wurde beschlossen, eine große Zahl der in England am T. A. arbeitenden Wissenschaftler nach Amerika zu senden, damit sie in den entsprechenden amerikanischen Gruppen arbeiten könnten.

Zu dieser Zeit entkam Prof. Bohr aus Dänemark, und die britische Regierung ernannte ihn zum Berater in wissenschaftlichen Angelegenheiten. Diese wissenschaftliche Beratung am T. A.-Projekt stand beiden Regierungen sowohl im Vereinigten Königreich wie in den Vereinigten Staaten zur Verfügung.

Prof. Oliphant und seine Gruppe von der Universität Birmingham übersiedelten nach Berkeley, um mit Prof. Lawrences Gruppe zu arbeiten, die sich mit Forschungen über die elektromagnetische Isotopentrennung befaßte. Zu ihnen stießen noch weitere Physiker aus Großbritannien, unter ihnen Prof. Massey vom University College in London, Dr. H. W. B. Skinner von der Universität Bristol, sowie Dr. Allibone und Dr. Wilkinson, die zum Teil in Berkeley und zum Teil an der Elektromagnetischen Trennungsanlage selbst arbeiteten.

Dr. Emeleus vom Imperial College in London, Dr. J. P. Baxter und andere wurden an die Elektromagnetische Anlage versetzt.

Dr. Frisch von der kernphysikalischen Gruppe in Liverpool und Dr. Bretscher von der entsprechenden Gruppe in Cambridge übersiedelten, zusammen mit einigen Mitgliedern ihrer Forschungsgruppe, an die große amerikanische T. A.-Forschungsstätte in Los Alamos, die in den amerikanischen Berichten über dieses Projekt beschrieben ist.

Zu ihnen stieß gleichzeitig oder etwas später eine Anzahl anderer britischer Wissenschaftler, unter ihnen Prof. Peierls und Dr. Penny vom Imperial College der Universität London. Prof. Sir Geoffrey Taylor stattete der Forschungsstätte mehrere Besuche ab.

Diese Versetzungen und die, welche für das Montrealprojekt gemacht wurden, hatten zur Folge, daß im Vereinigten Königreich alle Arbeit über den elektromagnetischen Prozeß vollständig aufhörte und die kernphysikalische Forschung fast auf den Nullpunkt reduziert wurde.

Trotzdem besteht kein Zweifel, daß dies der richtige Weg war, nachdem man beschlossen hatte, der raschest möglichen Erzeugung einer Atombombe zum Gebrauch in diesem Krieg den höchsten Vorrang zu geben.

ANHANG 8. BERICHT DES KANADISCHEN INFORMATIONSMINISTERIUMS VOM 13. AUG. 1945

„Aus allen Teilen der Welt erhalten wir Anfragen, die das weitverbreitete Interesse an der in Kanada ausgeführten Arbeit bekunden, durch die die Erzeugung der Atombombe ermöglicht wurde», sagte hier (in Ottawa) heute Hon. C. D. Howe, Minister für Munition, Armeelieferungen und Wiederaufbau (Minister of Munitions and Supply and Reconstruction).

„Der Abwurf der ersten Atombombe ist jedoch der Höhepunkt der Arbeit von Wissenschaftlern aus vielen Nationen, der Zusammenfassung der wissenschaftlichen und natürlichen Hilfsquellen der Vereinigten Staaten, Großbritanniens und Kanadas, und der Ausgabe von Hunderten von Millionen Dollars seitens der Vereinigten Staaten, und von kleineren, aber namhaften Summen seitens von Kanada, für Anlagen und Einrichtungen im Hinblick auf die ausgedehnteste wissenschaftliche Anstrengung, die jemals zur Erzeugung einer neuen Waffe gemacht wurde.

„Da Kanada reichliche Vorräte an Ausgangsmaterialien und Wasser besitzt und ferner isolierte Gegenden, die sich gut zu der Arbeit eignen, war es mit Voraussicht, Unternehmungsgeist und mit Hilfe der Organisation des Nationalen Forschungsrats (National Research Council) in der Lage, als Pionier ein wichtiges neues Gebiet der Technologie zu betreten. Die Zukunft wird die vollen Friedensmöglichkeiten dieser bemerkenswerten neuen Energiequelle enthüllen.

„Das Interesse an den wissenschaftlichen Fragen dieser Errungenschaft ist derart, daß wir nach Beratung mit Dr. C. J. Mackenzie, dem Präsidenten des National Research Council, beschlossen haben, die folgenden Einzelheiten zu veröffentlichen."

EINRICHTUNG EINES GROSSEN LABORATORIUMS IN MONTREAL

Kanada ist seit der Zeit, als Rutherford seine Untersuchungen über Radioaktivität im Jahre 1899 an der McGill-Universität be-

gann, mit der wissenschaftlichen Entwicklung auf diesem Gebiet verknüpft gewesen. Die Untersuchungen waren jedoch bis zum Ausbruch des Krieges im Jahre 1939 auf die Universitätslaboratorien beschränkt. Seit dieser Zeit richten sich die Interessen der Wissenschaftler, die in Großbritannien, den Vereinigten Staaten, Kanada und Frankreich an diesem Gegenstand arbeiteten, auf die Möglichkeit einer praktischen Auswertung. Nach dem Zusammenbruch Frankreichs wurden französische Wissenschaftler, die an dem Problem arbeiteten, von Prof. Joliot veranlaßt, sich mit den britischen Wissenschaftlern zu vereinen. Im Oktober 1940 wurden Informationen über diese und andere Kriegsforschungen zwischen Großbritannien, den Vereinigten Staaten und Kanada ausgetauscht. Gegen Ende 1942 schlugen die Briten vor, einen wichtigen Teil der Arbeit in Kanada als gemeinsames Unternehmen auszuführen. Dementsprechend wurde ein gemeinsames Laboratorium mit einem Forscherstab aus dem Vereinigten Königreich und Kanada in Montreal unter der Direktion des National Research Council eingerichtet. Der Stab dieses Laboratoriums ist nunmehr auf über 340 Mitglieder angewachsen, bei weitem die größte Organisation, die jemals in diesem Lande für ein einziges Forschungsprojekt geschaffen wurde.

Die Anlage in Petawawa

Als Ergebnis von Übereinkünften zwischen den drei teilnehmenden Regierungen wurde die Arbeit dieses Laboratoriums eng mit der ungeheuren Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet in den Vereinigten Staaten koordiniert. Seine Arbeit führte zum Entwurf einer Versuchsanlage zur Erzeugung von Materialien für die Atombombe; diese Anlage wird nun in Petawawa, Ontario, von der Defence Industries Limited gebaut als Teil des gemeinsamen Programms des Vereinigten Königreichs, der Vereinigten Staaten und Kanadas. Ein Zweig des National Research Council wird dort in enger Verbindung mit der Versuchsanlage eingerichtet werden, um Forschungen über die Anwendung der Atomenergie im Krieg und in der Industrie und über den Gebrauch ihrer Produkte in Forschung und Medizin auszuführen.

Uran ist das hauptsächlichste Material, das für den Betrieb dieser Versuchsanlage und zur Erzeugung von Materialien für

Atombomben benötigt wird. Eines der beiden wichtigsten Lager der Welt wurde von Gilbert Labine in der Nähe des Großen Bären-Sees in Kanada entdeckt. Um diesen wichtigen Bestand dem kanadischen Volk zu erhalten und den Vorrat zugunsten der Vereinigten Nationen zu schützen, übernahm die Regierung des Dominions die Minen und die Ausbeutungsanlage zu Eigentum.

Das Platzen des Uran-Atoms

Seit einiger Zeit kennen die Physiker die Möglichkeit, Atomenergie frei zu setzen. Die ersten Andeutungen kamen kurz nach der Entdeckung des Radiums, als Curie herausfand, daß es Wärme erzeugt und sich auf einer Temperatur erhält, die um einige Grad höher liegt als die der Umgebung. Die Quelle dieser Wärmeenergie wurde von Rutherford während seiner Forschungen an der McGill-Universität zu Beginn dieses Jahrhunderts untersucht, und es gelang ihm, zu zeigen, daß Radium und ein paar ähnliche Substanzen eine neue Art von Strahlung senden. Diese Strahlen kommen vom innersten Teil des Radiumatoms, der sein Kern genannt wird.

1919 ging Rutherford noch weiter und zeigte, daß man den Atomkern durch künstliche Mittel veranlassen kann, Strahlen auszusenden, und daß dabei Energie frei wird. Bei diesem Prozeß sendet der Atomkern einen kleinen Teil seiner selbst aus als Geschoß von sehr hoher Geschwindigkeit. Dies nennt man die künstliche Umwandlung eines Atoms, weil der Verlust eines kleinen Teils seine Natur ändert.

In den folgenden Jahren wurden viele neue Methoden zum Aufbrechen des Kerns entdeckt. Eine der wirksamsten war der Gebrauch von Neutronen, das sind Geschosse, die 1932 von Chadwick entdeckt wurden. Das Neutron ist in Wirklichkeit ein Teil des Atomkerns und kann ausgestoßen werden, wenn das Atom umgewandelt wird. Ein Neutron, das von einem Kern ausgestoßen wird, kann gelegentlich mit dem Kern eines andern Atoms zusammenstoßen, in ihn eintreten und dadurch oft eine Verwandlung des zweiten Atoms hervorrufen.

In diesen frühen Experimenten wurde die Atomenergie bei jedem Versuch nur aus einzelnen Atomen freigesetzt und erfor-

derte spezielle und empfindliche Apparate zu ihrer Registrierung. Erst 1939 erweckte die Entdeckung der «Spaltung» oder des Platzens von Uranatomen die Hoffnung, daß es vielleicht möglich sei, Atomenergie in großem Maßstab freizusetzen, so daß sie militärisch und industriell angewandt werden könnte. Physiker und Chemiker in zahlreichen Laboratorien der ganzen Welt hatten versucht, das Verhalten des schweren Elementes Uran zu verstehen, wenn es Neutronenstrahlen ausgesetzt wird. Allmählich, nach und nach, durch sorgfältige Versuche, fanden sie die Erklärung. Sie entdeckten, daß die Strahlen das Uranatom in zwei Teile aufspalteten. Sie fanden, daß dieses Platzen oder die «Spaltung», wie es genannt wird, bei einem Uranatom über zehnmillionenmal heftiger ist als das Platzen eines Moleküls eines modernen hochexplosiven Sprengstoffs.

Das Platzen eines Moleküls eines hochexplosiven Sprengstoffs ist ein chemischer Vorgang — einer der vielen chemischen Vorgänge, die uns vertraut sind, wie das Rosten des Eisens und das Verbrennen der Kohle. Diese Vorgänge werden durch Kräfte *zwischen den Atomen* herbeigeführt, die man chemische Kräfte nennt. Im Gegensatz dazu wird das Platzen des Uranatoms von Kräften *innerhalb des Atomkerns* hervorgerufen, von Kräften, die ungeheuer viel stärker sind als die chemischen Kräfte zwischen den Atomen.

Neutronen liefern den «Auslöser»[1]

Die Uranspaltung unterscheidet sich von gewöhnlichen Atomumwandlungsprozessen. Zur Umwandlung gehört der Ausstoß eines relativ kleinen Teiles des Atomkerns, wie eines Neutrons oder eines Elektrons. Der Verlust dieses Teiles ändert die Eigenschaften des Atoms einschließlich seines chemischen Verhaltens. Bei der Spaltung jedoch zersplittert das Uranatom in zwei große Teile, die zu zwei neuen Atomen von chemisch verschiedenen Elementen werden; dies war eine so überraschende Entdeckung, daß die Wissenschaftler fürchteten, niemand würde sie glauben. Außerdem ist die Spaltung eines Uranatoms vom Ausstoß von Neutronen begleitet. Die Zahl der ausgesandten Neutronen wech-

[1] Das Wort «trigger» bedeutet: Abzug (wie beim Gewehr), Drücker, allgemein Auslöser.

selt, sie liegt aber zwischen eins und drei. Das ist eine Tatsache von größter Bedeutung, denn sie eröffnet die Möglichkeit, daß der gleiche Spaltungsprozeß auf benachbarte Uranatome ausgedehnt werden kann. Ein anderer wichtiger Punkt, in dem sich die Spaltung von der Umwandlung unterscheidet, ist, daß die bei der Spaltung freigesetzte Energie viele Male größer ist.

Der Eintritt eines Neutrons in den Kern des Uranatoms ist der «Auslöser», der den Spaltungsprozeß auslöst. Da bei der Spaltung auch Neutronen ausgesandt werden, können sie weiter als «Auslöser» für die Spaltung von noch anderen Uranatomen wirken, und so können unter günstigen Bedingungen ganze Spaltungsketten erzeugt werden, wobei jede Spaltung durch ein Neutron hervorgerufen wird, das aus einer früheren Spaltung stammt. Auf diese Weise kann sich der Prozeß selbst ausbreiten und selbst verstärken, so daß ein Vorgang, der im Anfang nur ein oder zwei Atome angriff, nach kurzer Zeit einen großen Teil der Atome in einem Materialblock angreifen kann. Mit andern Worten, eine «Kettenreaktion» ist entstanden. Das sind die Bedingungen, die verwirklicht werden müssen, wenn die bei diesen Kernprozessen freigesetzte Energie in großem Umfang verfügbar gemacht werden soll. Wenn sich die Kettenreaktion sehr schnell ausbildet, wird die Energie in einer heftigen Explosion freigesetzt wie in einer Bombe; wenn der Ablauf der Kettenreaktion beherrscht wird, kann die Energie mit mäßiger Geschwindigkeit freigesetzt werden.

Überwindung zahlreicher Schwierigkeiten

Die Freisetzung der Atomenergie im großen hängt gänzlich von der Erhaltung der erzeugten Neutronen ab, damit sie noch weitere Spaltungen hervorrufen können. Wenn der Neutronenvorrat durch Verluste vergeudet wird, so wird die Verbrennung der Uranatome absterben wie ein Feuer, dem Luft mangelt. Neutronenverluste können auf viele Arten entstehen. Einige entweichen lediglich aus dem Uran nach außen; andere können vom Uran selbst oder von fremden Substanzen absorbiert werden. Alle Materialien absorbieren Neutronen. Jede Substanz, die im Uran vorhanden ist, tritt mit ihm um den verfügbaren Vorrat an diesen Teilchen in Wettstreit.

Auch im Uran selbst erzeugen nicht alle absorbierten Neutronen Spaltung. Im gewöhnlichen Uran, wie es in der Natur vorkommt, gibt es drei Arten von Uranatomen, die durch die Namen U-238, U-235 und U-234 unterschieden werden. Man hat sie so genannt, weil sie 238mal, bzw. 235 und 234mal so schwer sind wie die leichteste Art von atomarem Wasserstoff. Beinahe alle Spaltungen erfolgen in den U-235-Atomen, aber das sind nur 0,7 % der Mischung. Die Zahl der U-234-Atome ist vernachlässigbar klein. Die U-238-Atome absorbieren leicht Neutronen ohne Spaltung (ausgenommen in einem geringen Maß, wenn sie von Neutronen sehr hoher Geschwindigkeit getroffen werden), und unglücklicherweise überwiegen die U-238-Atome in natürlichem Uran bei weitem. Damit sich die Reaktion mit der größtmöglichen Geschwindigkeit vervielfachen kann, ist es daher nötig, U-235 allein oder wenigstens mehr oder weniger frei von Beimischung von U-238 zu verwenden.

In einer Masse von U-235 gehen die Neutronen hauptsächlich durch Entweichen in die Außenluft verloren. Die Bedeutung dieses Effekts kann reduziert werden, indem man die Masse vergrößert, da die Neutronenproduktion, die ein Volumeneffekt ist, mit der Größe schneller zunehmen wird als der Entweichungsverlust, der ein Oberflächeneffekt ist. Daraus folgt, daß, wenn die Explosion überhaupt möglich ist, sie eine Minimalmasse an Material verlangt, die man die kritische Größe nennt. So ist die Explosion in ihrem Mechanismus sehr verschieden von der gewöhnlichen chemischen Explosion, denn sie kann sich nur ereignen, wenn die Materialmenge größer als dieser kritische Betrag ist. Materialmengen, die kleiner sind als der kritische Betrag, sind stabil und vollkommen sicher. Wenn auf der andern Seite der Materialbetrag den kritischen Wert übersteigt, ist er unstabil, und eine Reaktion wird sich ausbilden und mit enormer Geschwindigkeit vermehren, bis sich eine Explosion von beispielloser Heftigkeit ergibt. Alles, was nötig ist, um die Bombe zur Explosion zu bringen, ist also, zwei Stücke des aktiven Materials, jedes kleiner als die kritische Größe, zusammenzubringen, so daß sie gemeinsam die kritische Masse übersteigen.

Die Abtrennung der U-235-Atome, die für die Spaltung am brauchbarsten sind, von den verhältnismäßig trägen U-238-Ato-

men ist äußerst schwierig. Beide Arten sind Uranatome. Sie haben identische chemische Eigenschaften, und daher kann kein chemisches Verfahren zwischen ihnen unterscheiden. Physikalische Methoden, die auf der sehr geringen Gewichtsdifferenz beruhen, müssen für ihre Trennung angewandt werden, und sehr große technische Schwierigkeiten mußten überwunden werden, um eine Methode zu entwickeln, die auch nur für Laboratoriumszwecke befriedigend war. Es war eine ungeheure Aufgabe, dies in dem Umfang zu tun, der für die Produktion der für eine Atombombe benötigten Materialmengen erforderlich war, und eine große industrielle Anstrengung war nötig. Jedoch wurde die Abtrennung von U-235 in den Vereinigten Staaten zustande gebracht.

Plutonium, eine neue Substanz

Uran ist nicht die einzige Substanz, die man spalten kann. Ein anderes spaltbares Material ist Plutonium. Diese Substanz kommt in der Natur nicht vor, sondern muß dadurch hergestellt werden, daß man Uran Neutronen aussetzt. Die U-238-Atome, die sehr wenig zu der Spaltung von gewöhnlichem Uran beitragen, sind die, welche sich verwandeln und schließlich zu Plutonium werden. Plutonium ist wie U-235 sehr spaltbar, und es hat den wichtigen Vorteil, daß es chemisch vom Uran verschieden ist und daher leicht von ihm durch chemische Methoden getrennt werden kann.

Eine neue Anlage zur Erzeugung von Plutonium

Die Anlage, die bei Petawawa gebaut wird, um Materialien zur Freisetzung von Atomenergie zu erzeugen, wird Uran und schweres Wasser enthalten. Wenn diese Materialien in gewissem Verhältnis und in genügender Menge zusammengebracht werden, entstehen Spaltungsketten, und große Energiemengen werden vom Uran in kontrollierbarer und nicht explosiver Weise freigesetzt.

Der zugrundeliegende Prozeß in der Anlage von Petawawa ist die Spaltung von U-235 durch ein *langsames* Neutron. Die Spaltung eines U-235-Atoms setzt Neutronen hoher Geschwindigkeit frei; diese stoßen mit den Molekülen des schweren Wassers zu-

sammen, ohne absorbiert zu werden, und so verlieren sie Geschwindigkeit, bis sie ihrerseits wieder Spaltung hervorrufen. Auf diese Weise bildet sich eine Kettenreaktion mit langsamen Neutronen aus. Dabei wird eine sehr große Anzahl von Neutronen freigesetzt. Einige davon werden von den U-238-Atomen absorbiert und erzeugen Plutonium. Später kann das Uran aus der Anlage entfernt und das Plutonium chemisch extrahiert werden.

Eine Hilfe für Forschung und Heilkunde

Andere Neutronen können in Stoffen absorbiert werden, die rund um das reagierende Uran angeordnet sind. Auf diese Weise kann man erwünschte neue radioaktive Stoffe in großen Mengen erzeugen. Daher wird die Anlage eine Quelle zur Lieferung solcher Stoffe sein, mit denen man chemische und biologische Prozesse studieren und die man in der Medizin anwenden kann.

Ein Teil der Spaltenergie wird in Form von schnellen Neutronen und energiereichen Gamma-Strahlen freigesetzt. Das reagierende Uran muß daher von Wänden umgeben sein, die die Neutronen absorbieren, um das daran arbeitende Personal vor Schädigungen zu schützen. Die Intensität der schnellen Neutronenstrahlung ist viel größer, als sie je vorher Physikern zugänglich war, und bietet große Möglichkeiten für die wissenschaftliche Forschung.

Eine industrielle Energiequelle

Der größere Teil der Spaltenergie tritt in Form von Wärme auf, die im Uranmetall erzeugt wird. Diese Wärme muß durch schnell fließendes Wasser oder Gas abgeführt werden. Die Oberflächentemperaturen des Metalls sind vorläufig zu niedrig, um wirksam zur Energieerzeugung ausgenützt zu werden, aber es besteht die Möglichkeit, daß diese Beschränkung durch weitere Arbeiten aufgehoben wird.

Der Forschungsrat entwirft die Anlage

Der Entwurf von Uranspaltungsanlagen bietet technische Probleme, die gänzlich verschieden sind von allen, die man bislang in Industrie und Technik antraf. Ein solcher Entwurf verlangt

die gemeinsamen Kenntnisse und Erfahrungen von experimentellen und mathematischen Physikern, Chemikern, Ingenieuren und Sachverständigen anderer Wissenschaften. Jeder wichtige Teil des Entwurfs ist auf schwierigen Berechnungen, Messungen und Experimenten aufgebaut.

Für die kanadische Betriebsanlage wurde diese Arbeit vom Laboratorium in Montreal ausgeführt; es wurde dabei durch die Erfahrungen und Informationen des USA.-Projekts, die auf Grund diesbezüglicher Vereinbarungen erteilt wurden, unterstützt. Das Laboratorium gab die grundlegenden Daten an die Defence Industries Limited weiter, die ausführliche Entwürfe für den Bau durch die Fraser Brace Company anfertigte.

Die größte und erlesenste Gruppe von Wissenschaftlern, die jemals in irgendeinem britischen Land für eine einzige Untersuchung versammelt war, hat in Kanada an den Experimenten und der Entwicklung der Atomenergie gearbeitet. Unter den kanadischen Wissenschaftlern und solchen von auswärts, die an dieser wissenschaftlichen Arbeit beteiligt waren, befanden sich: Dr. C. J. Mackencie, Präsident des Nationalen Forschungsrats; Dr. J. D. Cockcroft, Universität Cambridge, England, Direktor des Laboratoriums des Nationalen Forschungsrats in Montreal; Dr. E. W. R. Steacie, Nationaler Forschungsrat, Ottawa, stellvertretender Direktor des Laboratoriums des Nationalen Forschungsrats in Montreal; Prof. P. Auger, Ecole Normale Supérieure, Paris; Dr. H. H. Halban, Collège de France; Dr. G. C. Laurence, Nationaler Forschungsrat; Dr. J. S. Mitchell, Universität Cambridge, England, und Addenbrooke's Hospital, England; Mr. R. E. Newell, Imperial Chemical Industries, England; Prof. F. A. Paneth, Universität Wien, Österreich, und Universität Durham, England; Dr. C. B. Pierce, Royal Victoria Hospital, Montreal; Dr. G. Placzek, Universität Wien, Oesterreich, und Cornell-Universität, USA.; Prof. B. W. Sargent, Queen's Universität, Kingston, Ontario; Prof. G. M. Volkoff, Universität von Britisch-Columbien, Vancouver.

(Der kanadische Bericht schließt mit den Namen und akademischen Angaben von rund 350 kanadischen und ausländischen Wissenschaftlern, die mit der Arbeit am Laboratorium in Montreal verknüpft sind.)

PERSONENREGISTER

Die Angaben beziehen sich auf Kapitel und Paragraphen mit Ausnahme der Angaben für die Anhänge, bei denen die Seiten oder die Anhang-Nummer, z. B. A-1, angegeben sind

SACHREGISTER